annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 1

inra

AAG
30.1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 30 (1) 1-107 (1979)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., Paris Cedex 75231.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur de la Station de Biochimie I et Physico-Chimie des céréales et de leurs dérivés C. E. R. D. T. A., le Noyer Lambert, 91300 Massy.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., C. N. R. Z. 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES. Tél. : **950-75-22**

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1979, **30** (1), 1-26.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant

II. — Interception de l'énergie solaire par une culture

C. VARLET-GRANCHER et R. BONHOMME

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 Versailles

Résumé

Dans un article précédent (Bonhomme, Varlet-Grancher 1977*b*), nous avons appliqué les lois de Kubelka-Munk pour étudier les échanges radiatifs d'une culture. Nous utilisons maintenant cette méthode pour calculer l'énergie solaire absorbée par un couvert végétal et établir ainsi l'efficience de son interception pour toutes les radiations solaires (ε_{itot} = énergie solaire absorbée par la culture/rayonnement global incident) et pour les rayonnements visibles (ε_{ivis} = énergie visible absorbée/énergie visible incidente). La validité de cette démarche a été testée en comparant (fig. 2) l'évolution des valeurs journalières ainsi calculées de ε_{ivis} et ε_{itot} en fonction de l'indice foliaire F, avec celles obtenues à partir de mesures (fig. 1) effectuées sur des cultures de Canne à sucre de caractéristiques connues (tabl. 2). Nous avons discuté les hypothèses (tabl. 1) faites sur la structure du couvert végétal pour utiliser ce mode de calcul (tabl. 5, 6 et 7). Ce modèle a alors été utilisé pour étudier l'effet de l'inclinaison des feuilles (fig. 3) des propriétés optiques du sol (fig. 4) et des feuilles (fig. 5) sur l'interception des rayonnements. Les facteurs qui ont le plus d'influence sont les propriétés optiques des feuilles et l'indice foliaire, ce dernier paramètre étant le plus variable au cours du développement de la culture. A partir de l'évolution des rayonnements incidents au cours de l'année en deux sites (Versailles 48° Nord, 2° Est ; Guadeloupe 16° Nord, 62° Ouest) et des caractéristiques moyennes (évolution de F, inclinaison des feuilles ...) pour différentes espèces (Maïs, Féverole, Blé d'hiver, Luzerne à Versailles ; Canne à sucre, Patate douce, Vigna sinensis en Guadeloupe), nous avons calculé l'efficience de ces cultures pour la durée de leur cycle de développement et pour l'année (tabl. 8). Ces cultures se comportent toutes comme d'assez bons capteurs d'énergie et ont des efficiences qui diffèrent peu (ε_{ivis} = 0,50 à 0,70) si l'on ne considère que la période semis-récolte. A l'échelle de l'année ε_i varie beaucoup plus et dépend à la fois de la répartition des rayonnements incidents et de la place du cycle dans l'année. Nous avons les relations :

$$\varepsilon_{ivis} \text{ annuel} = -0{,}95\ G\tau/Ga - 0{,}95$$
$$\varepsilon_{itot} \text{ annuel} = -0{,}73\ G\tau/Ga - 0{,}72$$

où $G\tau$ est le rayonnement global reçu pendant les périodes d'interception nulle ou faible ($\varepsilon_i < \varepsilon_{imax}$ fig. 2 ; avant semis, après récolte, implantation et vieillissement de la végétation) et Ga le rayonnement global annuel.

I. — Introduction

La biomasse produite par un couvert végétal résulte du fonctionnement de plusieurs mécanismes physiologiques complexes ; cependant tout le matériel organique utilisé pour la croissance et le développement des plantes provient de l'activité photosynthétique des feuilles qui permet de fixer l'énergie du rayonnement solaire en éner-

gie potentielle chimique. Il est donc possible de caractériser l'efficience de la photosynthèse de la culture, ou sa productivité, par un rendement énergétique (Nichiporovich et Stogonova, 1957 ; Gaastra, 1958 ; Loomis et Williams, 1963 ; Monteith, 1965...).

Nous avons analysé ce rendement énergétique pour des cultures tropicales au cours de leur cycle (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1974 ; Varlet-Grancher *et al.*, 1976, 1978), en séparant les caractéristiques du climat, de la fonction « interception » des rayonnements incidents par la végétation, et la fonction « conversion » de cette énergie absorbée par la culture.

L'extension de cette analyse à diverses espèces, pour différents climats, nécessite, entre autre, une étude des variations de l'efficience de l'interception.

Pour éviter la répétition d'un grand nombre de mesures spécifiques, l'utilisation d'un modèle permettant de calculer l'absorption de l'énergie solaire par une culture en fonction des paramètres qui la caractérisent, s'avère particulièrement utile. Les travaux effectués sur l'analyse de l'assimilation nette du gaz carbonique d'un couvert végétal, à partir de la réponse photosynthétique des feuilles et de leur éclairement, ont suscité le développement d'un grand nombre de modèles de distribution des rayonnements solaires dans la végétation (Monsi et Saeki, 1953 ; Monteith, 1965 ; Chartier, 1966 ; Acock *et al.*, 1969...). Cependant ces modèles ont surtout cherché à simuler la pénétration des rayonnements directs et, sont le plus souvent insuffisants pour calculer l'énergie absorbée par la culture (Lemeur et Blad, 1974), ou sont très complexes et donc difficiles à utiliser.

Nous avons dans une première partie (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1977*b*), appliqué les lois de pénétration de la lumière en milieu diffusant, établies par Kubelka et Munk (1931), pour étudier les échanges radiatifs d'une culture. Nous utilisons ici cette méthode pour calculer l'énergie solaire absorbée par un couvert végétal et, après avoir testé sa validité par rapport à des mesures effectuées sur des cultures de canne à sucre, nous étudierons les variations de l'absorption pour des couverts fictifs dont nous ferons varier les paramètres caractéristiques.

II. — Méthodes et techniques

2.1. — *Energie interceptée par un couvert végétal*

Pour décrire les interactions entre les rayonnements du soleil et un couvert végétal, il est commode de schématiser la culture (fig. 1*a*) à l'aide de trois plans horizontaux délimitant les parties inférieure et supérieure du couvert végétal (considéré comme le capteur d'énergie) et le sol qui le supporte (Allen et Richardson, 1968 ; Fuchs, 1972...).

L'énergie interceptée par le couvert végétal est alors obtenue par la différence entre l'énergie qu'il reçoit (somme des rayonnements incidents ou réfléchis par le sol vers la végétation) et l'énergie qu'il perd (somme des rayonnements réfléchis par l'ensemble sol-culture et transmis au sol). Ces divers rayonnements correspondent à des éclairements énergétiques reçus sur un plan horizontal ; ils seront exprimés en fonction du rayonnement incident de manière à définir une efficience de l'interception soit pour la totalité de l'énergie ε_{itot}, soit pour la partie visible (seule utile pour la photosynthèse) ε_{ivis}.

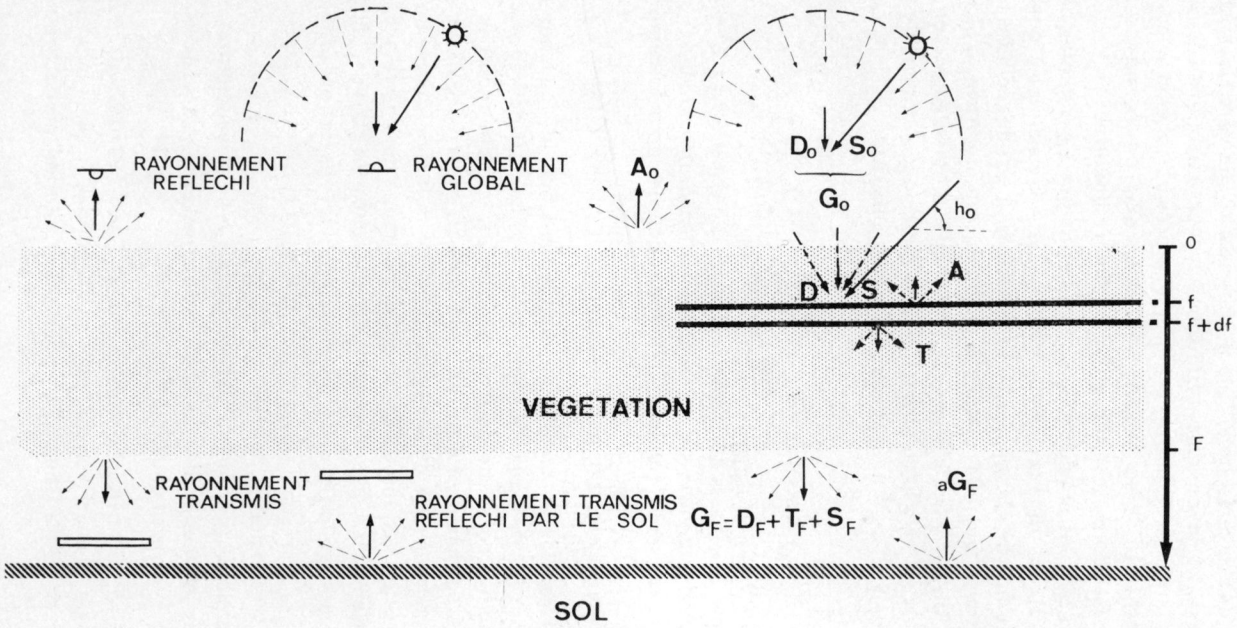


FIG. 1. — *Schéma montrant la méthode de mesure (1a) et de calcul (1b) des efficiences de l'interception des rayonnements solaires.*

Diagram showing measurement (1a) and calculation (1b) method for solar efficiency.

2.11. — *Mesure de l'énergie absorbée par une culture.*

Les rayonnements solaires global G_0 et réfléchi par l'ensemble sol-culture A_0 sont mesurés par deux pyranomètres de Moll (Kipp et Zonen) placés horizontalement à un mètre au-dessus du couvert végétal ; le premier est dirigé vers l'atmosphère et le second vers la culture. Le rayonnement transmis à travers la culture G_F est obtenu par des pyranomètres linéaires (Combres *et al.*, 1970) placés au sol et montés en série. Le rayonnement réfléchi par le sol vers la végétation aG_F est estimé à partir de l'albédo du sol a et de G_F, ou mesuré par un pyranomètre linéaire.

Les rayonnements visibles incidents G_{0vis} et réfléchis par l'ensemble sol-culture A_{0vis} sont obtenus à l'aide d'un spectroradiomètre I.S.C.O. ou estimés à partir de la mesure de la densité du flux de photons visibles (400-700 nm), par des cellules Lambda. L'énergie visible transmise G_{Fvis} est estimée à partir du rayonnement total transmis G_F et de la relation : $G_{Fvis} = G_F(0{,}5 - 0{,}028\,6\,F)$ établie d'après Anderson (1969) ; la partie réfléchie par le sol vers la culture $a_{vis}\,G_{Fvis}$ est calculée à partir de l'albédo visible du sol a_{vis} obtenu à l'aide d'un spectroradiomètre I.S.C.O.

Nous aurons :

$$\varepsilon_{i(tot)} = [(G_0 + aG_F) - (A_0 + G_F)]/G_0$$
$$\varepsilon_{i(vis)} = [(G_{0vis} + a_{vis}\,G_{Fvis}) - (A_{0vis} + G_{Fvis})]/G_{0vis}.$$

Les mesures ont été effectuées au Domaine Duclos à Petit-Bourg (16° Nord, 62° Ouest) sur des cultures de canne à sucre (*Saccharum officinarum*) conduites selon les techniques classiques et optimales (fumure, irrigation) définies pour la région.

2.12. — *Calcul de l'énergie absorbée par une culture.*

La végétation est considérée comme un empilement fictif de couches qui sont délimitées par des plans horizontaux (fig. 1*b*) dont la position est définie par l'indice foliaire (surface de feuilles par unité de surface de sol) f, cumulé depuis le sommet. L'axe des f est orienté positivement à partir de la surface supérieure de la culture : $f = 0$ jusqu'à la surface inférieure de la végétation : $f = F$ (indice foliaire de toute la culture). On calcule l'interception de l'énergie : dI pour une couche mince, d'épaisseur df, et l'on intègre entre 0 et F pour obtenir l'interception du couvert végétal.

Les éclairements énergétiques à un niveau f dans la végétation sont dus aux rayonnements :

— directs S (dans les taches de soleil),

— diffusés par le ciel D (parvenant par les « trous » de la végétation),

— interceptés par le feuilles des couches inférieures et supérieures, et qui sont rediffusés vers le haut A et vers le bas T.

Dans un travail précédent (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1977*b*), nous avons évalué ces flux pour un couvert végétal pouvant répondre à certaines hypothèses simplificatrices sur sa structure (tabl. 1) et pour une radiation monochromatique :

$$S_\lambda = S_{\lambda 0} \exp(-Kf)$$
$$D_\lambda = D_{\lambda 0} \exp(-K'f)$$
$$T_\lambda = C_5(1-\alpha)\exp(\alpha f) + C_6(1+\alpha)\exp(-\alpha f) + C_7 \exp(-Kf) + C_8 \exp(-K'f)$$
$$A_\lambda = C_5(1+\alpha)\exp(\alpha f) + C_6(1-\alpha)\exp(-\alpha f) + C_9 \exp(-Kf) + C_{10} \exp(-K'f)$$

TABLEAU 1

Enoncé des hypothèses nécessaires pour calculer les éclairements énergétiques dans le couvert végétal

Hypothèses introduced in model

Hypothèse 1. — L'azimut des feuilles a la même probabilité de prendre n'importe quelle valeur de 0 à 2Π : il n'y a pas d'azimuts privilégiés.

Hypothèse 2. — La probabilité de présence d'une feuille en un point donné d'une couche ne dépend pas de la position de ce point, que ce dernier soit dans une tache de soleil ou dans une zone d'ombre ; il n'y a pas de superpositions privilégiées.

Hypothèse 3. — L'inclinaison i est la même pour toutes les feuilles.

Hypothèse 4. — La pénétration du rayonnement diffus du ciel D suit une loi de type :

$$D = D_0 \exp[- K'(i)\, f].$$

K′ est donné en annexe 2.

Hypothèse 5. — Les rayonnements interceptés et rediffusés par les feuilles (T : descendant, A : ascendant) sont isotropes à chaque niveau à l'intérieur du couvert végétal.

Hypothèse 6. — Le facteur de réflexion R est égal au facteur de transmission des feuilles.

avec :

$S_{\lambda 0}$ = rayonnement solaire direct monochromatique au-dessus de la culture,
$D_{\lambda 0}$ = rayonnement solaire diffus monochromatique au-dessus de la culture,
K = facteur d'extinction du rayonnement solaire direct calculé pour différentes valeurs de l'inclinaison des feuilles i et de la hauteur du soleil h (annexe 1),
K′ = facteur d'extinction du rayonnement solaire diffus du ciel, calculé pour différentes valeurs de i (annexe 2),
$\alpha = \sqrt{1 - 2\, R_\lambda}$,
R_λ = facteur de réflexion monochromatique des feuilles (supposé égal au facteur de transmission),
C_5, C_6, C_7, C_8, C_9 et C_{10} = constantes qui sont fonction de $S_{\lambda 0}$, $D_{\lambda 0}$, K, K′ et aussi de l'indice foliaire total de la culture F et de l'albédo du sol nu a (annexe 3).

L'énergie dI_λ interceptée par une couche df à un niveau f est :

$$dI_\lambda = - dS_\lambda - dD_\lambda - dT_\lambda + dA_\lambda.$$

On a donc :

$$dI_\lambda/df = 2\, C_5\, \alpha^2 \exp(\alpha f) + 2\, C_6\, \alpha^2 \exp(-\alpha f) + K(C_7 + S_{\lambda 0} - C_9) \exp(-Kf) + K'(C_8 + D_{\lambda 0} - C_{10}) \exp(-K' f)$$

et l'énergie interceptée par l'ensemble du couvert végétal est :

$$I_\lambda = \int_0^F dI_\lambda$$

$$I_\lambda = 2\, \alpha[C_5 \exp(\alpha F) - C_6 \exp - (\alpha F)] - (C_7 + S_{\lambda 0} - C_9) \exp(-KF) - (C_8 + D_{\lambda 0} - C_{10}) \exp(-K' F) - C_{11}$$

avec :

$$C_{11} = 2\, \alpha(C_5 - C_6) - (C_7 + S_{\lambda 0} - C_9) - C_8 + D_{\lambda 0} - C_{10}).$$

On peut définir pour la longueur d'onde considérée une efficience d'interception :

$$\varepsilon_i = I_\lambda/(D_{\lambda 0} + S_{\lambda 0}) = I_\lambda/G_{\lambda 0}.$$

Les propriétés optiques des feuilles (R) varient assez peu dans de larges bandes spectrales (Knipling, 1970); il est donc possible de prendre une valeur moyenne pour la gamme des radiations visibles (400-700 nm) et une autre pour le proche infra-rouge (700-1 400 nm). Si l'on considère que l'énergie solaire incidente est composée pour moitié de visible et pour moitié de proche infra-rouge (les rayonnements négligés représentent moins de 10 p. 100 de l'énergie totale (Suraqui, 1972 ; Baille *et al.*, 1977.) on peut alors calculer les efficiences $\varepsilon_{i(vis)}$ et $\varepsilon_{i(tot)}$.

2.2. — *Mesure des paramètres caractéristiques de la culture*

2.21. — *Description de la géométrie de la culture.*

La description quantitative de la géométrie du couvert végétal consiste à attribuer des coordonnées (niveau, azimut, inclinaison) à chaque élément qui le compose. Pour les graminées, les feuilles se répartissent à peu près sur un même plan vertical qui prend statistiquement toutes les orientations dans la végétation. Dans ces conditions, on peut admettre que les feuilles où éléments de feuilles dans la culture, ont la même probabilité de prendre n'importe quel azimut ; il suffit donc de déterminer leur niveau et leur inclinaison. Pour cela, on délimite à l'aide d'un cadre, les volumes de végétation situés au-dessus des surfaces de prélèvement connues prises au hasard. Les feuilles sont assimilées à des morceaux plans mis bout à bout dont on mesure l'inclinaison moyenne par rapport à l'horizontale à l'aide d'un rapporteur muni d'un fil à plomb (Chartier, 1969 ; Eckardt *et al.*, 1971...) et la hauteur au-dessus du sol. Pour simplifier le travail, la culture est divisée en couches horizontales (de 50 cm d'épaisseur pour la canne à sucre) et les éléments de feuilles regroupés par classe d'inclinaison (0-30°, 30-60° 60-90°). Ces données peuvent aussi être estimées à partir de photographies de la silhouette de plantes prélevées au hasard dans la culture (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1978). Ces différentes mesures ont été effectuées à plusieurs stades au cours du développement du couvert végétal.

La géométrie de toute la végétation ou de chaque couche est décrite soit par une inclinaison moyenne, soit par la distribution ou le cumul des fréquences d'inclinaison.

2.22. — *Mesure de l'indice foliaire.*

L'indice foliaire (surface des feuilles vertes au-dessus d'une unité de surface de sol) est obtenu directement à partir de la mesure de la surface du matériel végétal prélevé pour décrire la géométrie de la culture ou indirectement à partir de photographie hémisphériques (Bonhomme, 1976). L'indice foliaire est établi par couche de végétation ou pour toute la culture, à différents stades.

2.23. — *Mesure des propriétés optiques des feuilles.*

Les coefficients de réflexion et de transmission des feuilles pour les gammes de longueur d'onde 400-700 nm et 700-1 100 nm sont mesurés à l'aide d'un dispositif analogue à celui de Sinclair et Thomas (1970).

TABLEAU 2

Principales caractéristiques des cultures de canne à sucre étudiées

Mean characteristics sugar cane crops

Année	Variété	Hauteur maximale du couvert végétal (cm)	Indice foliaire maximum F	Inclinaison moyenne $\bar{i}$ pour F maximum (degré)	Propriétés optiques des feuilles (feuilles jeunes, culture de 200 jours)				Coefficient de Réflexion du sol nu humide	
					visible		proche infrarouge		visible	proche infra-rouge
					Réflexion R_{vis}	Transmission T_{vis}	Réflexion R_{PIR}	Transmission T_{PIR}	a_{vis}	a_{PIR}
1973-1974 (plantation)	PR1059	420	7,5	59					0,070	0,080
1974-1975 (repousse)	PR1059	400	8,0	61					—	—
1975-1976 (plantation)	PR1059	380	5,5	65	0,075	0,079	0,353	0,428	—	—
—	HJ5741	400	5,5	67	0,073	0,073	0,333	0,471	—	—
—	B64277	360	5,0	65	0,080	0,070	0,352	0,452	—	—

III. — Validité de l'application des lois de rayonnement en milieu diffusant au calcul de l'interception de l'énergie solaire

Les efficiences obtenues à partir des mesures de rayonnement (cf. § 2.11) faites sur des cultures de canne à sucre (ε_i mesurées) sont comparées aux efficiences calculées à l'aide de la méthode précédente (cf. § 2.12) appliquée à un couvert végétal fictif (cf. hypothèses du tabl. 1) dont les paramètres caractéristiques (inclinaison des feuilles, propriétés optiques des feuilles et du sol) ont les valeurs moyennes mesurées sur les cultures réelles.

3.1. — *Mesure de l'énergie absorbée par des cultures de canne à sucre*

Les valeurs journalières de $\varepsilon_{i(tot)}$ et $\varepsilon_{i(vis)}$ mesurées tout au long du cycle de développement de différentes cultures de canne à sucre, dont les principales caractéristiques (tabl. 2) diffèrent peu, sont portées en fonction de l'indice foliaire F sur la figure 2.

La dispersion des points expérimentaux donne l'importance de la variabilité de nos mesures. Celle-ci peut résulter plus de l'imprécision des valeurs de ε_i et de F que de réelles différences d'absorption. En effet, l'indice foliaire est un paramètre qu'il est difficile d'estimer avec une erreur inférieure à 10 p. 100 et la précision sur l'efficience de l'interception, qui résulte des erreurs commises sur les mesures des différentes composantes et de leur importance relative (énergie transmise en particulier) est dans les meilleurs des cas (absorption maximale) également d'environ plus ou moins 10 p. 100.

3.2. — *Calcul de l'énergie absorbée par une culture de canne à sucre*

La méthode de calcul décrite dans le chapitre précédent permet d'obtenir une valeur de ε_i (totale ou visible) pour une hauteur de soleil (ho) et une répartition des rayonnements incidents directs et diffus (ou D_0/G_0) données. Pour calculer un ε_i jour-

---

FIG. 2. — *Evolution des valeurs journalières de $\varepsilon_{i(vis)}$ et $\varepsilon_{i(tot)}$ en fonction de l'indice foliaire F, mesurées sur différentes cultures de canne à sucre (symboles) et calculées (courbes en trait plein).*

Daily values efficiencies ($\varepsilon_{i\ vis}$ and $\varepsilon_{i\ tot}$) evolution with leaf area index (F) for sugar cane crops measurements (symbols) and calculations (full lines).

o — Variété PR1059 année 1973-1974.
● — Variété PR1059 année 1974-1975.
X — Variété PR1059 année 1975-1976.
Δ — Variété HJ5764 année 1975-1976.
□ — Variété B64277 année 1975-1976.

Courbe 2*a* $\varepsilon_{i(vis)}$ calculée avec :

$$i = 65^o\ ;\ R_{vis} = 0{,}075\ ;\ a_{vis} = 0{,}070$$

Courbe 2*b* $\varepsilon_{i(tot)}$ calculée avec :

$$i = 65^o\ ;\ R_{vis} = 0{,}075\ ;\ R_{PIR} = 0{,}40$$
$$a_{vis} = 0{,}070\ ;\ a_{PIR} = 0{,}080.$$

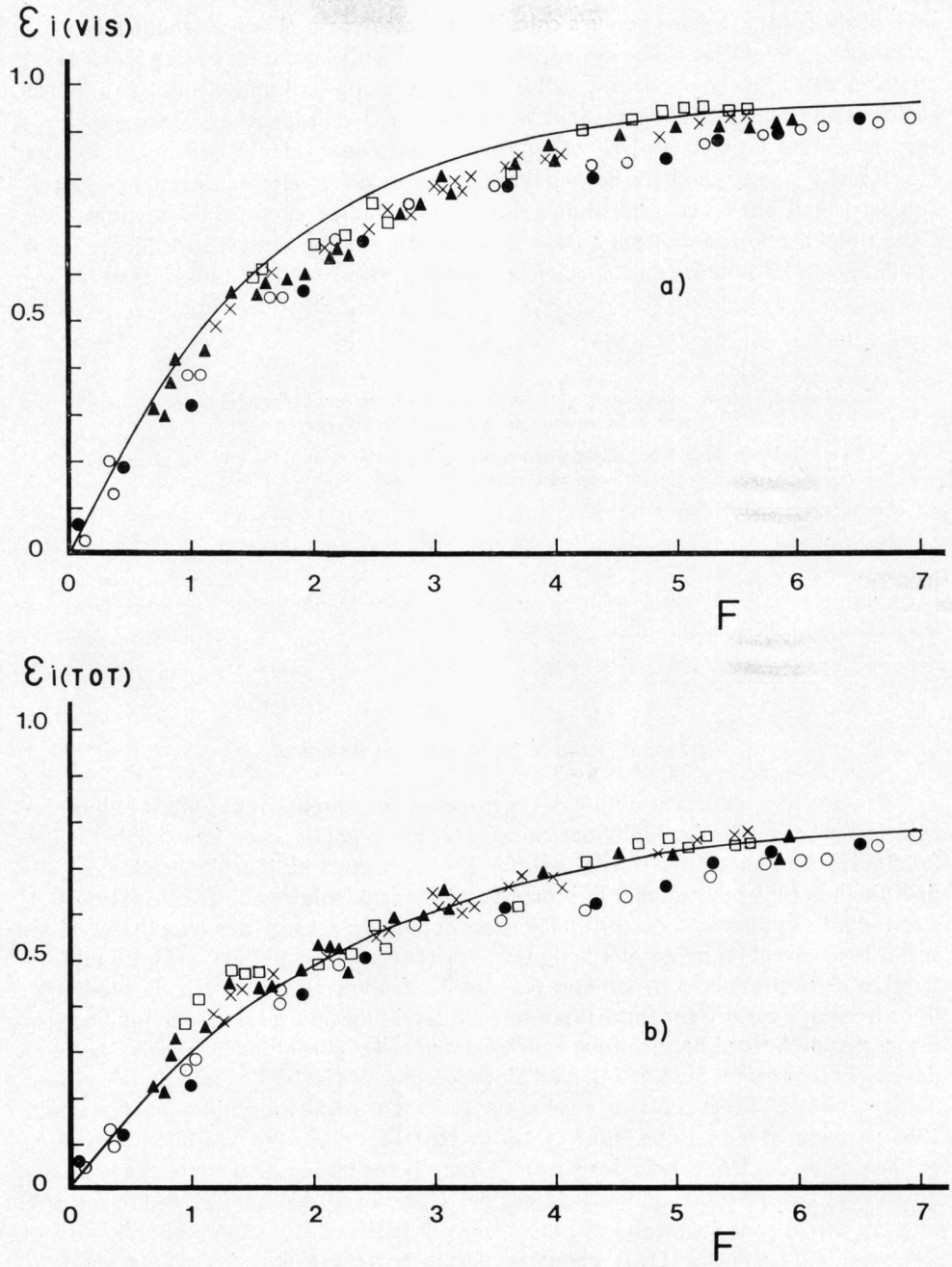


FIG. 2.

nalier, il faut tenir compte de la course du soleil et de l'évolution du rapport D_0/G_0, sauf lorsque le ciel est couvert ($D_0/G_0 = 1$) puisqu'il n'y a pas d'influence de la hauteur du soleil. Pour simplifier les calculs, on peut considérer cette situation comme générale. Le tableau 3 compare les valeurs calculées dans ce cas à celles obtenues en tenant compte d'une évolution réelle des rayonnements global et diffus (cas du 24 juillet 1973) au cours de la journée pour une culture dont les feuilles ont une inclinaison i de 65° et des coefficients de réflexion dans le visible (R_{vis}) et le proche infrarouge (R_{pir}) respectivement de 0,10 et 0,40, et en considérant deux valeurs de l'indice foliaire $F = 0,5$ et $F = 4,0$. Le choix des valeurs des autres paramètres nécessaires aux calculs est orienté par les caractéristiques des cultures étudiées données dans le tableau 2. Cette simplification conduisant à des valeurs seulement légèrement surestimées, nous appliquerons la situation du ciel couvert à tous les calculs utilisés dans ce texte.

TABLEAU 3

Calcul des efficiences journalières ε_i : comparaison de la valeur de l'intégration journalière avec celle obtenue en supposant le ciel couvert

Daily efficiency calculation : comparison between daily integration value and that obtained by assuming overcast sky

	F = 0,5		F = 4,0	
	ε_i visible	ε_i total	ε_i visible	ε_i total
Intégration journalière	0,24	0,15	0,84	0,65
Ciel couvert	0,26	0,16	0,88	0,68

3.3. — *Validité de la méthode de calcul*

Compte tenu de la variabilité des mesures et des simplifications utilisées dans les calculs, l'accord entre les évolutions calculées et mesurées des ε_i en fonction de l'indice foliaire (F) nous paraît très satisfaisant (fig. 2) et permet de justifier l'utilisation des lois de Kubelka-Munk pour estimer l'absorption de l'énergie solaire par un couvert végétal. Cependant l'application de cette méthode suppose le respect des hypothèses faites sur la structure et les propriétés optiques de la végétation (H_1, H_2, H_3 et H_6 du tabl. 1).

Les deux premières hypothèses (azimut des feuilles aléatoire, pas de superpositions privilégiées) reviennent à supposer que les feuilles où éléments de feuilles sont dispersées au hasard dans chaque couche et que celles-ci sont indépendantes les unes des autres (Lemeur et Blad, 1974). Il est alors possible de décrire l'atténuation du rayonnement solaire direct dans la végétation selon un profil logarithmique (Chartier, 1966 ; Cowan, 1968 ; Isobe, 1969...), ce qui correspond à une variation théorique exponentielle des fréquences des « trous » dans la végétation pour toutes les hauteurs du soleil. La vérification globale de ces deux premières hypothèses peut donc être faite en comparant les fréquences théoriques et réelles des « trous » (Bonhomme et Chartier, 1972 ; Fuchs, 1972) obtenues par la technique dite des points quadrats (Warren Wilson, 1960) ou à partir de photographies hémisphériques (Anderson, 1971 ; Bonhomme, 1976). C'est cette dernière technique qui a été utilisée pour les cultures de canne à sucre étudiées.

La mesure directe de l'indice foliaire (F), à différents stades de développement d'une culture de canne à sucre, comparée aux mesures de la surface relative de trouées pour la hauteur de visée 35° (s_{35}), permet le calcul de β :

$$s_{35} = e^{-\beta F}$$

où β est analogue au coefficient d'extinction K(i, h) pour h = 35°. Les mesures conduisent à des valeurs de β voisines de 0,70 qui diffèrent donc de la valeur théorique 0,868 de K(i, h) pour i = 65° (cf. annexe 1). Si l'on suppose que les rapports β/K(i, h) restent du même ordre de grandeur pour toutes les hauteurs, il est possible d'estimer des coefficients d'extinction K et K′. Le tableau 4 donne sur canne à sucre, pour deux

TABLEAU 4

Calcul des efficiences ε_i par ciel couvert : comparaison des valeurs obtenues avec les coefficients théoriques d'extinction des rayonnements ou avec des coefficients d'extinction estimés à partir des photographies hémisphériques (voir texte)

Comparison of efficiency obtained with radiation theoritical extinction coefficient and estimated coefficient by means of hemispherical photographs

	F = 0.5		F = 4.0	
	ε_i visible	ε_i total	ε_i visible	ε_i total
Coefficients théoriques	0.26	0.16	0.88	0.68
Coefficients estimés	0.22	0.14	0.83	0.65

valeurs de l'indice foliaire, les valeurs comparées de l'interception journalière de la culture en prenant en compte les coefficients d'interception théoriques ou estimés. Les écarts introduits par le non-respect des hypothèses H_1 et H_3 restent donc faibles. Il faut cependant signaler que selon les couverts végétaux les valeurs de K et K′ seront inférieures ou supérieures aux coefficients théoriques.

TABLEAU 5

Géométrie d'une culture de canne à sucre (PR1059, 140 *jours après plantation*). *Répartition de la surface foliaire en fréquence par classe d'inclinaison, inclinaison moyenne et indice foliaire par couche et pour toute la végétation*

Sugar cane crop geometry (*var* PR1059, 140 *days after plantation*). *Percentage leaf area falling in three angle classes and average inclination in each layer and for the whole canopy*

Couche (cm)	Fréquence d'Inclinaison			Inclinaison moyenne ($\bar{i}^o$)	Indice
	0-30°	30-60°	60-90°		
0-50	0	0,532	0,468	59	0,24
50-100	0,030	0,509	0,461	58	0,49
100-150	0,065	0,383	0,552	60	1,17
150-200	0,046	0,150	0,804	68	1,67
200-250	0,115	0,234	0,651	61	1,16
250-300	0,306	0.248	0,446	49	0,08
Toute la végétation	0,072	0,264	0,664	63	4,81

TABLEAU 6

Evolution de la géométrie d'une culture de canne à sucre (variété PR 1059) *au cours de son développement. Répartition de la surface foliaire en fréquence par classe d'inclinaison, inclinaison moyenne pour toute la végétation.*

Sugar cane geometry variation during growing season (var PR 1059). *Percentage leaf area falling in three angle classes and average inclination for the whole canopy*

Nombre de jours après plantation	Fréquence d'Inclinaison			Inclinaison moyenne (i)
	0-30°	30-60°	60-90°	
57	0,400	0,420	0,280	42
83	0,134	0,357	0,609	56
99	0,147	0,358	0,494	55
118	0,091	0,219	0,690	62
138	0,072	0,264	0,664	53
162	0,056	0,263	0,681	63
187	0,072	0,276	0,652	63
272	0,071	0,187	0,742	65
312	0,089	0,206	0,705	64
340	0,025	0,265	0,710	63

La géométrie du couvert végétal peut être décrite par la distribution de la surface foliaire (ou sa fréquence) entre différentes classes d'inclinaison(cf. § 2.21) ou par une inclinaison moyenne pour les différentes couches considérées ou la végétation entière. Les tableaux 5 et 6 donnent la géométrie ainsi décrite, à un stade donné et son évolution au cours du développement de la culture pour l'une des variétés utilisées (les résultats sont très proches pour les autres). La distorsion entre la géométrie réelle du couvert et la géométrie théorique en supposant l'inclinaison des feuilles constantes (H_3) peut être considérée comme assez faible à chaque stade particulier mais il faudrait tenir compte de l'évolution au cours du temps. De telles variations ont été signalées pour la betterave par Hodanova (1972), alors que pour le maïs la géométrie varie peu tout au long du cycle (Archer communication personnelle).

Le tableau 7 montre que les valeurs des coefficients de réflexion (R) et de transmission (T) des feuilles diffèrent peu entre les variétés étudiées. Dans la gamme des rayonnements infrarouges, la transmission est un peu supérieure à la réflexion alors que les valeurs de R et de T sont pratiquement égales dans le visible. Des mesures beaucoup plus fines au point de vue spectrales que les nôtres, effectuées par Gaussman *et al.* (1973) sur des feuilles matures et saines d'un assez grand nombre d'espèces dont la canne à sucre, montrent une réflexion légèrement supérieure à la transmission dans le visible. L'hypothèse H_6 (tabl. 1) $R = T$ peut donc être considérée comme acceptable (avec une distorsion plus importante pour la gamme des radiations proches infrarouges). Les valeurs moyennes pour le visible varient avec l'âge de la culture ($R = T = 0{,}071$ à $0{,}104$, tabl. 8) mais ces écarts importants sur R et T conduisent à des différences beaucoup plus faibles sur l'absorption de chaque feuille (0,86 à 0,79) et l'on peut penser qu'une seule valeur moyenne pour toute la durée de vie de la végétation ne conduira pas à une erreur importante sur le calcul de l'efficience.

TABLEAU 7

Propriétés optiques des feuilles de canne à sucre

Sugar cane leaves optical properties

	Visible		Proche Infra-rouge	
	Réflexion	Transmission	Réflexion	Transmission
Culture 200 jours après plantation				
• Feuilles jeunes				
PR1059 (8 mesures)	0,075 ± 0,005	0,079 ± 0,010	0,353 ± 0,014	0,428 ± 0,023
HJ5741 (4 —)	0,073 ± 0,014	0,073 ± 0,014	0,333 ± 0,053	0,417 ± 0,006
B64277 (4 —)	0,080 ± 0,010	0,070 ± 0,021	0,352 ± 0,056	0,453 ± 0,056
• Feuilles âgées				
PR1059 (8 mesures)	0,067 ± 0,005	0,056 ± 0,006	0,336 ± 0,012	0,397 ± 0,027
• Toutes feuilles	0,073 ± 0,003	0,069 ± 0,006	0,343 ± 0,012	0,420 ± 0,014
	$R_{vis} = T_{vis} = 0{,}071 \pm 0{,}003$			
Culture 300 jours après plantation				
• Feuilles jeunes				
PR1059 (5 mesures)	0,113 ± 0,023	0,127 ± 0,013	0,336 ± 0,036	0,449 ± 0,061
HJ5741 (3 —)	0,112 ± 0,028	0,103 ± 0,034	0,356 ± 0,080	0,431 ± 0,056
B64277 (3 —)	0,098 ± 0,034	0,104 ± 0,072	0,354 ± 0,035	0,458 ± 0,062
• Feuilles âgées				
PR1059 (5 mesures)	0,096 ± 0,048	0,099 ± 0,044	0,348 ± 0,033	0,436 ± 0,029
HJ5741 (1 —)	0,079	0,056	0,328	0,410
B64277 (1 —)	0,093	0,075	0,352	0,407
• Toutes feuilles			0,353 ± 0,012	0,432 ± 0,016
	$R_{vis} = T_{vis} = 0{,}104 \pm 0{,}008$			
Culture 200 et 300 jours après plantation				
• Toutes feuilles (42 mesures)	—	—	0,337 ± 0,008	0,425 ± 0,011

TABLEAU 8

Estimation de l'efficience de l'interception des rayonnements solaires sur le cycle et sur l'année pour quelques cultures

Calculated cycle and annual efficiency for some crops in two stations.

	Culture	Durée du cycle D (jours)	Efficiences sur le cycle		Efficiences sur l'année	
			$\varepsilon_{i\,(vis)}$	$\varepsilon_{i\,(tot)}$	$\varepsilon_{i\,(vis)}$	$\varepsilon_{i\,(tot)}$
Versailles						
	Maïs	163	0,50	0,35	0,32	0,23
	Féverole	147	0,64	0,41	0,41	0,32
	Blé d'Hiver	234	0,62	0,40	0,40	0,31
	Luzerne	365	0,57	0,43	0,57	0,43
Guadeloupe						
	Vigna sinensis	76	0,53	0,39	0,13	0,09
	Patate douce	154	0,62	0,44	0,25	0,17
	Canne à sucre	365	0,72	0,54	0,72	0,54

Ainsi, pour les cultures étudiées, les hypothèses faites sur la structure et les propriétés optiques de la végétation ne sont pas rigoureusement respectées mais ces différences ne conduisent pas à des écarts importants entre l'absorption de l'énergie solaire calculée et mesurée. En fait, pour la canne à sucre, ces hypothèses sont assez bien vérifiées dans les couches qui regroupent la plus grande partie de la surface foliaire, mais dans les cas où la densité foliaire est faible dans toutes les couches, les distorsions de la structure réelle par rapport à la structure théorique peuvent peut-être conduire à des estimations de ε_i moins bonnes. Cependant, l'application des lois Kubelka-Munk nous paraît possible pour un grand nombre de cultures.

IV. — Variations théoriques de l'énergie interceptée par un couvert végétal

La quantité d'énergie solaire visible ou totale absorbée par un couvert végétal du semis à la récolte résulte :

— de son efficience pour intercepter les rayonnements,

— de la quantité d'énergie reçue.

L'efficience pour absorber l'énergie incidente varie au cours du développement de la culture, en particulier avec l'évolution de l'indice foliaire (cf. fig. 2). L'efficience augmente d'abord fortement avec l'implantation de la culture (mise en place du système foliaire) jusqu'à une valeur maximale, puis reste constante. L'efficience obtenue sur l'ensemble du cycle de développement dépend donc du niveau de cette valeur maximale et de la durée respective de ces deux phases (l'importance de la première résultera de la concavité de la courbe d'évolution de ε_i avec F).

La quantité d'énergie reçue par le couvert végétal dépend évidemment de la durée de son cycle mais aussi de l'évolution du rayonnement incident pendant cette période.

A l'aide du modèle défini précédemment (cf. § 2.12 et 3.2 : ciel couvert), nous étudierons l'influence des caractéristiques : inclinaison des feuilles, propriétés optiques des feuilles et du sol, sur les variations de ε_{itot} et ε_{ivis} en fonction de l'indice foliaire F. Puis, nous utiliserons ces résultats pour estimer l'efficience obtenue sur le cycle de développement et sur l'année de quelques cultures en deux sites : Guadeloupe (rayonnement incident toujours élevé) et Versailles (grandes variations de l'énergie incidente avec la saison).

4.1. — *Etude des variations de l'efficience d'interception d'un couvert végétal pendant sa croissance*

4.11. — *Influence de l'inclinaison des feuilles.*

La figure 3 donne les variations de ε_{itot} (fig. 3*b*) et de ε_{ivis} (fig. 3*a*) en fonction de l'indice foliaire F pour différentes inclinaisons moyennes des feuilles i = 0, 15, 30, 45, 60 et 75°. Les propriétés optiques des feuilles et du sol restant constantes ($R_{vis} = 0{,}10$; $R_{PIR} = 0{,}40$; $a_{vis} = 0{,}10$; $a_{PIR} = 0{,}10$).

L'influence de l'inclinaison est plus marquée sur ε_{ivis} ; forte pour les faibles indices foliaires, elle devient négligeable pour les valeurs de F supérieures à 4. Ces résultats

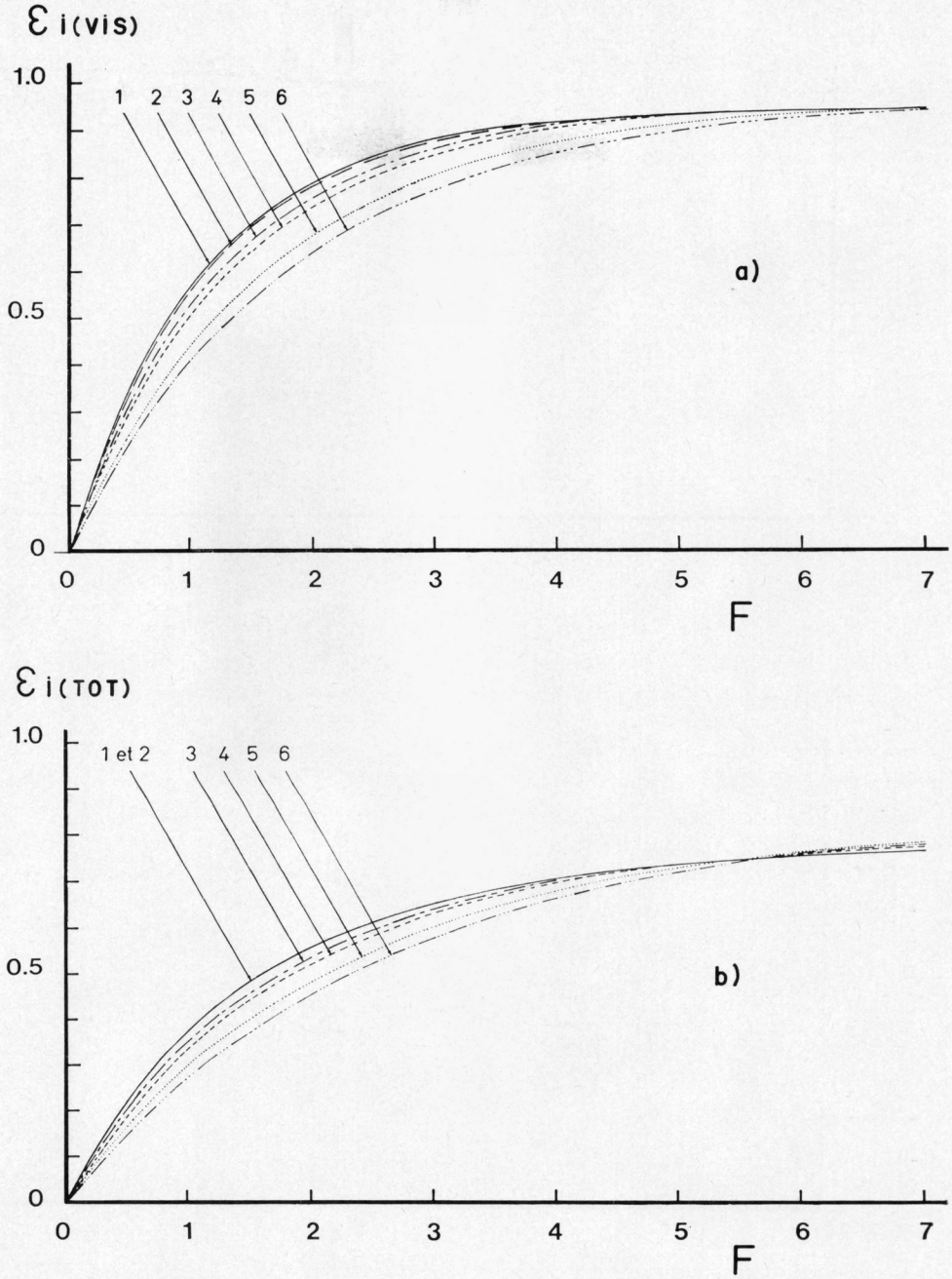


FIG. 3. — *Evolution des valeurs journalières de* $\varepsilon_{i(vis)}$ *et* $\varepsilon_{i(tot)}$ *en fonction de l'indice foliaire F, calculées pour différentes inclinaisons moyennes des feuilles* ($\bar{i}$) *et avec :*

$T_{vis} = R_{vis} = 0{,}10$; $T_{PIR} = R_{PIR} = 0{,}40$; $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}10$

Daily values efficiences ($\varepsilon_{i\ vis}$ *and* $\varepsilon_{i\ tot}$) *evolution with leaf area index ; calculations for different average leaves inclination* ($\bar{i}$).

Courbe 1. — i = 0°. Courbe 4. — i = 45°.
Courbe 2. — i = 15°. Courbe 5. — i = 60°.
Courbe 3. — i = 30°. Courbe 6. — i = 75°.

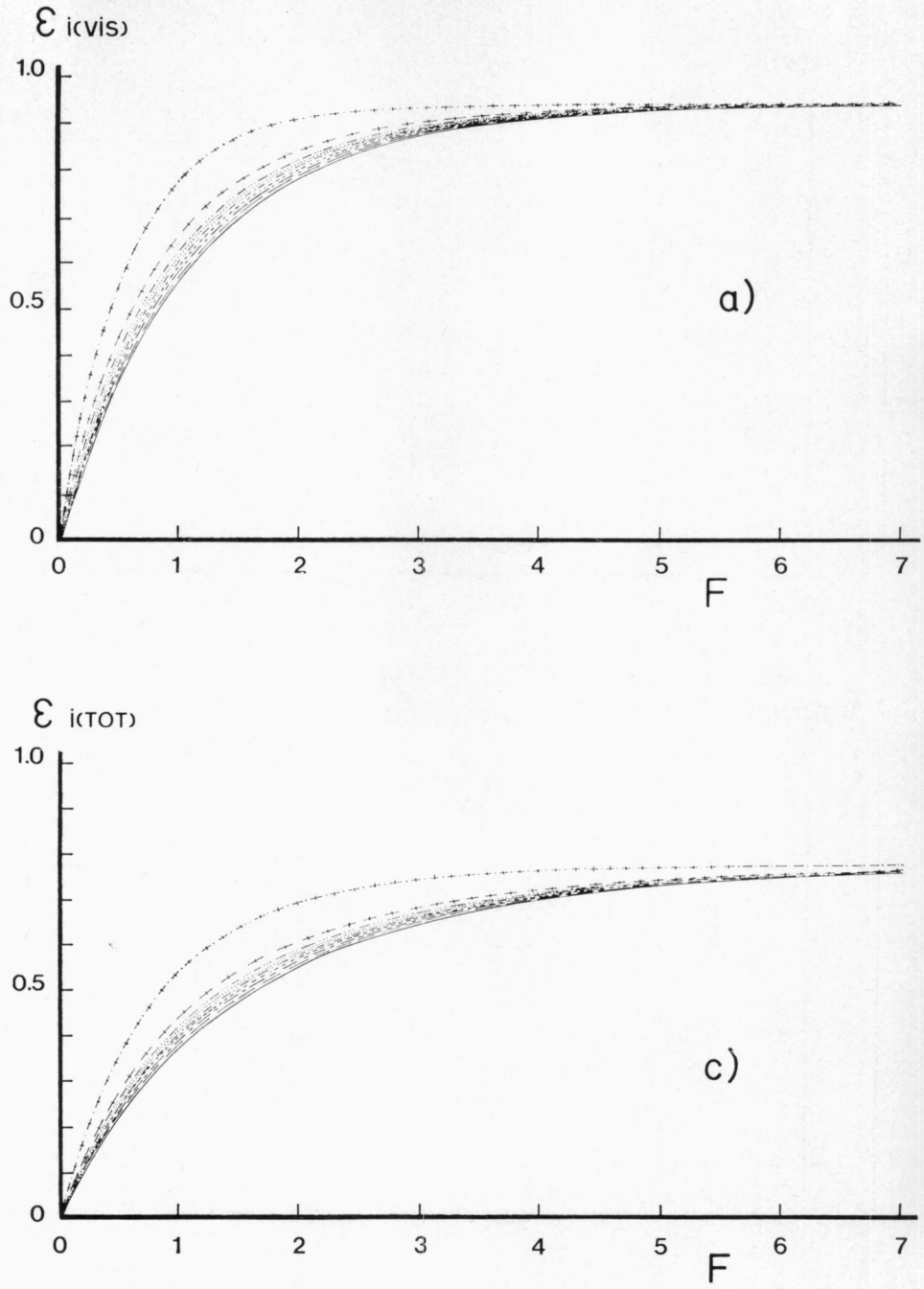
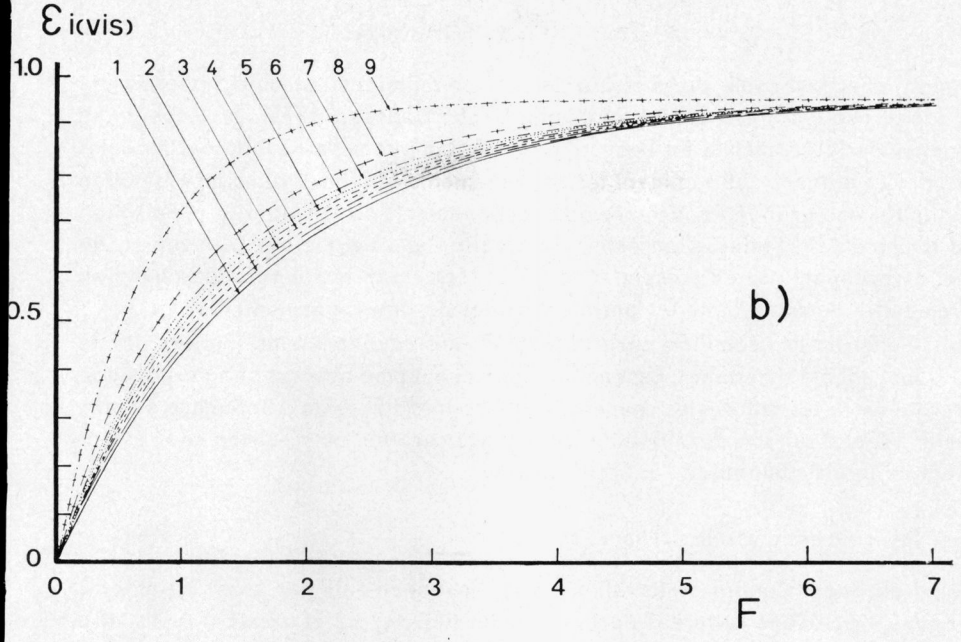
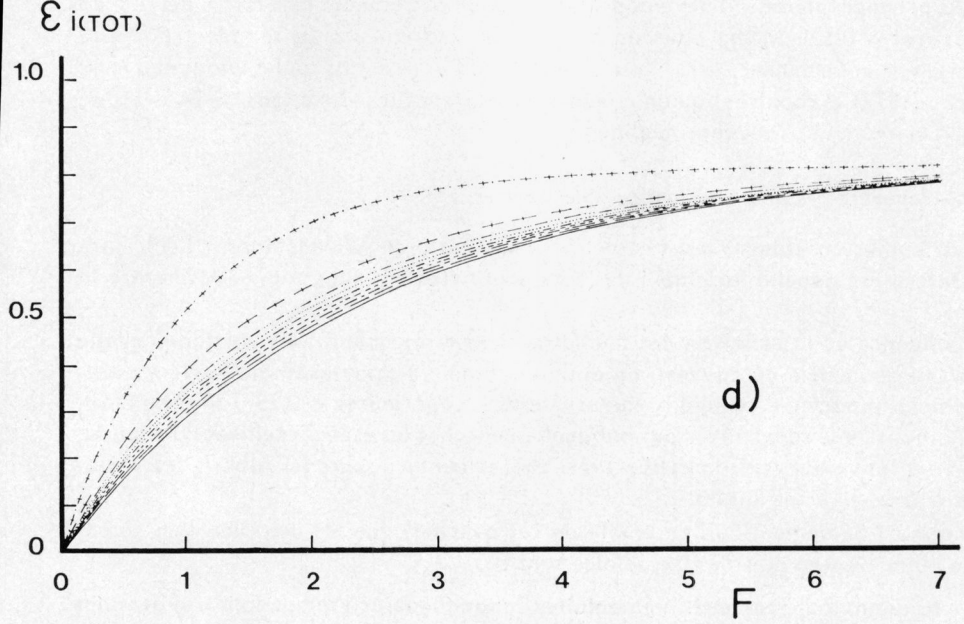


FIG. 4. — *Evolution des valeurs journalières de* $\varepsilon_{i(vis)}$ *et* $\varepsilon_{i(tot)}$ *en fonction de l'indice foliaire F calculées* $i = 0^o$ (*fig. 4a et 4c*) ; $i = 65^o$ (*fig. 4b et 4d*), *avec*

Daily values efficiencies ($\varepsilon_{i\ vis}$ *and* $\varepsilon_{i\ tot}$) *evolution with leaf area index ; calculation for different soil*

Courbe 1. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}05$.
Courbe 2. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}10$.
Courbe 3. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}15$.
Courbe 4. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}20$.
Courbe 5. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}25$.





pour différentes valeurs de l'albédo du sol (a) et en considérant deux inclinaisons moyennes des feuilles : $R_{vis} = T_{vis} = 0{,}10$ et $R_{PIR} = T_{PIR} = 0{,}40$.

optical properties and using two leaf inclination (i : 65°, *4b and 4d ; i =* 0°, *4a and 4c).*

Courbe 6. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}30$.

Courbe 7. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}35$.

Courbe 8. — $a_{vis} = a_{PIR} = 0{,}50$.

Courbe 9. — $a_{vis} = a_{PIR} = 1{,}00$.

confirment l'effet favorable du port horizontal sur l'interception dans les premiers stades, prévu par d'autres auteurs (Monteith, 1972 ; Chartier, 1975, ...). Cependant, l'importance de la géométrie est beaucoup plus faible que celle déduite des modèles utilisés par ces auteurs qui négligent les rayonnements rediffusés dans la végétation (donnant ainsi une grande importance aux rayonnements directs dont la pénétration dépend fortement de l'interaction entre l'inclinaison des feuilles et la hauteur du soleil) et ne prennent pas en compte l'énergie réfléchie par le sol vers la végétation (relativement importante dans les premiers stades de développement).

Ainsi l'effet de la géométrie sur l'absorption des rayonnements solaires par la culture a souvent été surestimé ; cependant, pour une même absorption la répartition de l'énergie entre les différentes couches peut être très différente. L'influence du port du couvert végétal sur son assimilation nette du gaz carbonique résultera donc essentiellement de la distribution de l'énergie solaire.

4.12. — *Influence des propriétés optiques du sol.*

L'effet des modifications de la réflexion des rayonnements par le sol est montré sur la figure 4 pour une culture à port horizontal (fig. 4*a*, 4*c*) et dressé (fig. 4*b*, 4*d*).

L'augmentation de l'albédo du sol conduit à une meilleure efficience de l'interception surtout pour les cultures érigées ; cependant cet effet n'est très important que dans les premiers stades de développement et pour des valeurs très fortes del'albédo (supérieures à 0,50). Même pour un sol très sec, ces valeurs ne semblent pas être atteintes (Varlet-Grancher, 1975 ; Idso *et al.*, 1975). Ces résultats sont analogues à ceux de Fuchs (1972) et montrent qu'en conditions naturelles les variations de l'albédo du sol doivent avoir une influence négligeable.

4.13. — *Influence des propriétés optiques des feuilles.*

Les feuilles constituent les « capteurs primaires » de la végétation ; l'efficience de l'interception dépend fortement de leurs propriétés optiques comme le montre la figure 5.

L'influence de la réflexion des feuilles sur ε_i est sensible à tous les stades quelle que soit la géométrie du couvert. La diminution de ε_{ivis} par exemple devient particulièrement importante pour des valeurs de R_{vis} supérieures à 0,25-0,30. Toutefois, ces conditions ne se rencontrent pas habituellement chez les espèces cultivées (Knipling, 1970). Pour les valeurs extrêmes observées chez la canne à sucre (cf. tabl. 7) les variations de ε_i restent assez faibles.

Il ressort finalement de l'ensemble de ces courbes, que les deux facteurs essentiels de l'interception de l'énergie solaire sont :

— la quantité de capteurs élémentaires (quantifiée par l'indice foliaire) pendant la phase d'installation de la culture ;

— la qualité de ces capteurs (traduite par les propriétés optiques) à tous les stades.

Les autres facteurs (géométrie, propriétés optiques du sol) interviennent pendant la première phase en modulant la valeur de l'indice foliaire pour laquelle l'efficience devient maximale.

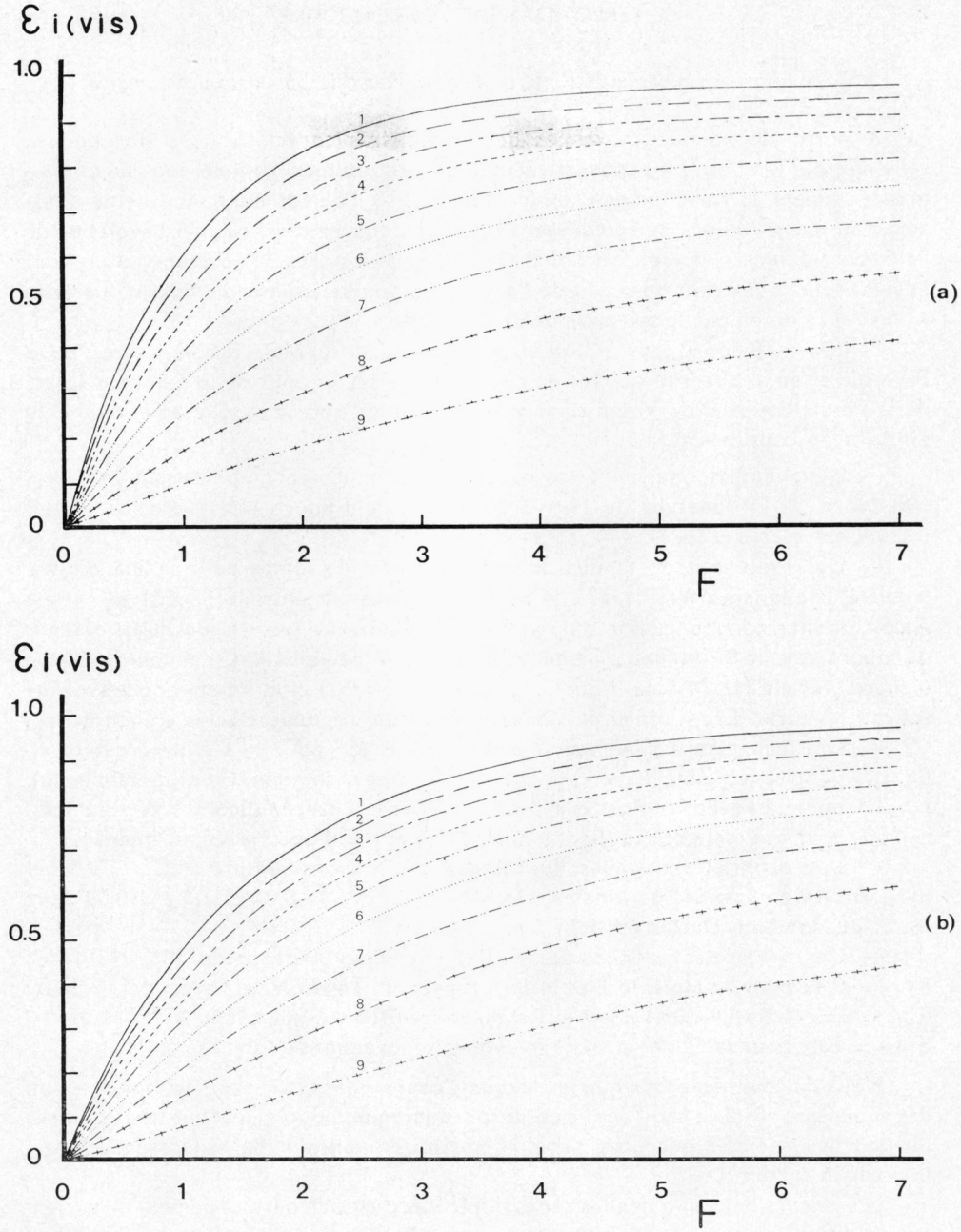


FIG. 5. — *Evolution des valeurs journalières de* $\varepsilon_{i\ vis}$ *en fonction de l'indice foliaire F calculées pour différentes valeurs de réflectance des feuilles* ($R_{vis} = T_{vis}$) *et pour des inclinaisons moyennes des feuilles de* 0° (5*a*) *et de* 65° (5*b*), *avec* $a_{vis} = 0{,}10$.

Daily values efficiences ($\varepsilon_{i\ vis}$ *evolution with leaf area index ; calculations for different leaves optical properties and using two leaf inclination* ($\bar{i}$: 0°, 5*a* ; $\bar{i} = 65°$, 5*b*)

Courbe 1. — $R_{vis} = 0{,}05$.
Courbe 2. — $R_{vis} = 0{,}10$.
Courbe 3. — $R_{vis} = 0{,}15$.
Courbe 4. — $R_{vis} = 0{,}20$.
Courbe 5. — $R_{vis} = 0{,}25$.
Courbe 6. — $R_{vis} = 0{,}30$.
Courbe 7. — $R_{vis} = 0{,}35$.
Courbe 8. — $R_{vis} = 0{,}40$.
Courbe 9. — $R_{vis} = 0{,}45$.

4.2. — *Efficience globale de l'interception de l'énergie par un couvert végétal*

A partir de valeurs moyennes des paramètres caractéristiques (inclinaison, réflexion des feuilles...) du couvert végétal, on peut estimer, comme nous l'avons vu précédemment, la variation de ε_i en fonction de F. Si l'on connaît la courbe de croissance en indice foliaire de ce couvert végétal, on pourra alors estimer l'évolution de l'efficience d'interception en fonction du temps. Enfin, à partir de l'évolution du rayonnement solaire incident au cours de l'année, on pourra estimer l'efficience de cette culture sur l'ensemble de son cycle de développement et sur l'année.

Le tableau 8 donne les résultats ainsi obtenus pour du Maïs, du Blé d'hiver, de la Féverole et de la Luzerne cultivés en région tempérée, et pour de la Canne à sucre, de la Patate douce et du Vigna sinensis en conditions tropicales. Ces valeurs ont été estimées en considérant :

— L'évolution des moyennes décadaires du rayonnement global reçu à Versailles (48° Nord, 2° Est : mesuré de 1941 à 1970) et à Petit-Bourg (16° Nord, 62° Ouest mesuré entre 1973 et 1976).

— Des évolutions de l'indice foliaire au cours du temps pour le Blé d'hiver (variété Thallan, Karterji, 1977), le Maïs et la Féverole (variété F7.EP1 et variété Ascott, Archer communication personnelle) et la Luzerne (variété du Puits) obtenus au laboratoire de Bioclimatologie de la Minière (près de Versailles) ; et pour la Canne à sucre (variété HJ5741), le Vigna sinensis (variété M53) et la Patate douce (variété Jabrun 4, Varlet-Grancher *et al.*, 1971) obtenus au domaine Duclos à Petit-Bourg.

— Des inclinaisons moyennes des feuilles $\bar{i} = 65°$ pour la Canne à sucre (cf. fig. 2), $\bar{i} = 55°$ pour le Blé (Ledent, 1972), le Maïs (Archer communication personnelle), $\bar{i} = 35°$ pour la Féverole (Ross et Nilson, 1967) et la Luzerne (Scott et Wells, 1969), $\bar{i} = 30°$ pour la Patate douce (Bonhomme, 1969) et $\bar{i} = 0$ pour le Vigna sinensis.

— Des propriétés optiques du sol que nous avons mesuré $a_{vis} = 0{,}08$ et $a_{PIR} = 0{,}14$ pour le sol de limon de la Minière et $a_{vis} = 0{,}07$ et $a_{PIR} = 0{,}08$ pour le sol du domaine Duclos (cf. tabl. 2).

— Des propriétés optiques des feuilles moyennes et identiques $R_{vis} = 0{,}10$ — $R_{PIR} = 0{,}40$ pour le Maïs, le Blé, la Luzerne et la Féverole et avec des valeurs $R_{vis} = 0{,}05$ — $R_{PIR} = 0{,}40$ pour la Patate douce (Bonhomme, 1969), $R_{vis} = 0{,}075$ — $R_{PIR} = 0{,}40$ pour la Canne à sucre (cf. valeurs moyennes du tabl. 7).

Nous ne commenterons que les résultats concernant l'efficience de l'interception des radiations visibles, étant donné qu'ils sont analogues pour ε_{itot} et que nous sommes plus particulièrement intéressés par ε_{ivis} comme composante du rendement énergétique de la culture.

Les valeurs de ε_{ivis} obtenues sur la durée des cycles de développement ne varient pas de façon importante ni systématique entre les espèces selon leur géométrie ou leur lieu de culture et l'on peut penser, que l'efficience de l'interception de tout couvert végétal en un site quelconque sera inclus dans cette gamme de variations.

Pour les valeurs annuelles, les écarts entre espèces sont importants particulièrement sous climat tropical où le caractère pérenne (Canne à sucre) semble très favorable alors qu'en région tempérée, la longueur du cycle apparaît moins liée à l'efficience de l'interception. La durée de l'interception est alors compensée par la faible importance du rayonnement reçu pendant la période hivernale (10 p. 100 de l'énergie

annuelle entre novembre et février pour Versailles au lieu de 30 p. 100 en Guadeloupe). L'efficience annuelle maximale est de 0,95 ; cette valeur correspond à un couvert végétal qui aurait une efficience journalière maximale tout au long de l'année (fig. 2). Pour une culture donnée, l'efficience sera d'autant plus proche de cette valeur que l'énergie ($G\tau$) reçue pendant les périodes d'interception faible ou nulle (fig. 2 : ε_i inférieur à ε_i maximum ; avant semis, après récolte, implantation de la végétation, vieillissement de la culture) est faible par rapport au rayonnement annuel (Ga) ; ce qui peut s'exprimer par la relation :

$$\varepsilon_i \text{ annuel} = \varepsilon_i \max (1 - G\tau/Ga).$$

Avec les données du tableau 8, nous avons obtenu :

$$\varepsilon_{i\,vis} \text{ annuel} = 0{,}95 - 0{,}95\ G\tau/Ga \quad \text{avec} \quad r = 0{,}99$$
$$\varepsilon_{i\,tot} \text{ annuel} = 0{,}73 - 0{,}72\ G\tau/Ga \quad \text{avec} \quad r = 0{,}98.$$

Ces relations permettent donc de calculer l'efficience annuelle d'une culture connaissant sa durée de pleine végétation et la répartition du rayonnement solaire global du lieu considéré.

V. — Conclusion

Il est possible d'appliquer, de façon satisfaisante, les lois de rayonnement en milieu diffusant, selon la méthode décrite, à un assez grand nombre de cultures et d'estimer ainsi l'énergie solaire qu'elles absorbent. Cette estimation sera d'autant plus performante que la structure du couvert végétal sera proche d'une structure théorique définie au travers des hypothèses formulées pour effectuer les calculs.

L'utilisation de cette méthode pour différents types de couverts végétaux montre que l'efficience journalière de l'absorption de l'énergie solaire est d'abord limitée par l'importance des surfaces d'interception (indice foliaire) puis atteint une valeur élevée qui reste sensiblement constante. Les propriétés optiques des feuilles peuvent modifier le niveau de l'efficience à tout moment alors que les autres facteurs (géométrie de la végétation, propriétés optiques du sol) agissent surtout au cours de la première phase et modifient l'indice foliaire pour lequel l'efficience devient maximale. En fait, pour les valeurs habituellement rencontrées, l'effet de ces paramètres reste faible. L'efficience obtenue sur la durée de chaque cycle montre que les espèces cultivées se comportent comme d'assez bons capteurs de rayonnements visibles (0,50-0,70) ; la plus faible interception du Maïs (dans nos conditions) peut être attribuée au trop faible développement du système foliaire (F ne dépasse pas 3 à 3,5).

Il est intéressant de connaître l'efficience sur la durée de l'année puisque cette période sert de base au calcul du rendement économique d'une culture. Les estimations que nous avons faites montrent que cette efficience dépend essentiellement de l'importance de l'énergie reçue au cours de la phase pendant laquelle l'interception journalière est nulle ou faible (avant semis, après récolte, installation de la végétation, vieillissement de la culture), par rapport à l'énergie reçue pendant toute l'année. Ainsi, pour les régions où les rayonnements incidents varient assez peu avec la saison, les plantes pérennes auront une efficience beaucoup plus élevée, alors que dans les régions tempérées, le rayonnement reçu pendant l'hiver représente une trop faible

partie de l'énergie annuelle pour assurer le même avantage. Dans ces climats, les meilleures efficiences seront obtenues par les espèces qui s'implanteront très tôt au printemps et qui seront récoltées le plus tard possible en automne.

L'efficience de l'interception n'est qu'une des composantes du rendement énergétique du couvert végétal et les conclusions qui viennent d'être données se limitent donc à l'absorption des rayonnements solaires. Cependant, une espèce qui présente une moins bonne interception peut être très efficace pour transformer l'énergie absorbée et présenter finalement un bon rendement énergétique.

Reçu pour publication en mars 1979.

Summary

Radiation laws in diffusing medium applied to plant canopy

II. — Crop trapping solar energy

In a previous paper (Bonhomme, Varlet-Grancher 1977*b*), Kubelka Munk theory vas used to study crop radiative exchanges. Here, this method is used to calculate crop solar trapping efficiency for total radiation ($\varepsilon_{i(tot)}$ = solar energy absorbed by canopy/global solar radiation) and photosynthetically active radiation PAR ($\varepsilon_{i(vis)}$ = PAR absorbed/incomming PAR). We have compared calculated daily values of $\varepsilon_{i(tot)}$ and $\varepsilon_{i(vis)}$ versus leaf area index (LAI) with those obtained by radiative measurements (fig. 2) made on sugar cane crops which have characteristics given in table 2. Hypotheses (table 1) on canopy structure inclused in this method are discussed (table 5, 6 and 7). The model is used to study the effect of mean leaves inclination and of soil and leaves optical properties on trapping radiation (fig. 3, 4 and 5), and shows that the greatest influence are those of leaves optical properties, but the importance of the relative variation of LAI during crop growth, makes the influence of this last factor predominant.We have computed (table 8) cycle (sowing-harvesting) and annual efficiency for corn, horse-bean, winter wheat and alfalfa in Versailles (48° North, 2° East), and sugar cane, sweet potatoes and cowpea in Guadeloupe (French West Indies 16° North, 62° West) with average incident global radiation during the year for two stations and mean canopy characteristics. For the growing season, efficiency is good enough and is quite the same for the differents species ($\varepsilon_{i(vis)}$ = 0,50 et 0,70). For the whole year efficiences values are more variable and depend highly on ratio $G\tau/Ga$ ($G\tau$ = incident energy during the period where $0 < \varepsilon_i < \varepsilon_i$ max, see fig. 2 ; Ga = annual incident radiation) :

$$\text{annual } \varepsilon_i = \varepsilon_i\text{max } (1 - G\tau/Ga)$$

(where $\varepsilon_i$max is maximum daily value and equal to 0,95 for PAR and 0,73 for total radiation, see fig. 2).

Zusammenfassung

Anwendung der Strahlungsgesetze in zerstreuender Umgebung auf die Pflanzendecke.

II. — Abfangen der Sonnenenergie durch eine Kultur

In einem vorherigen Bericht (Bonhomme, Varlet-Grancher, 1977*b*) wurden die Gesetze von Kubelka-Munk angewandt, um den Strahlungsaustausch einer Kultur zu untersuchen. Diese Methode wird jetzt benutzt, um die durch eine Pflanzendecke aufgenommene Sonnenenergie zu berechnen und somit die Leistungsfähigkeit ihres Abfangens für alle die Sonnenstrahlungen $\varepsilon_{i\ tot}$ = durch die Kultur aufgenommene Sonnenenergie/einfallende Gesamtstrahlung) und für die sichtbaren Strahlungen ($\varepsilon_{i\ vis}$ = aufgenommene sichtbare Energie/einfallende sichtbare Energie) festzustellen. Die Gültigkeit dieser Annäherungsmethode wurde beim Vergleich (Abb 2) der Entwicklung der so berechneten Tageswerte von $\varepsilon_{i\ vis}$ und $\varepsilon_{i\ tot}$ in Bezug auf den Blattindex F mit den Werten, die aus Messungen (Abbl) auf Zuckerrohrkulturen mit bekannten Eigenschaften erzielt worden sind (Tafel 2), getestet. Die Hypothesen hinsichtlich der Struktur der Pflanzendecke (Tafel 1) werden besprochen, um diese Berechnungsweise zu benutzen (Tafel 5, 6, 7).

Dieses Modell wurde dann gebraucht, um die Auswirkung des Blatteinfallwinkels (Abb 3), der optischen Eigenschaften des Bodens (Abb 4) und der Blätter (Abb 5) auf das Abfangen der Strahlungen zu prüfen. Die einflussreicheren Faktoren sind die optischen Eigenschaften der Blätter und der Blattindex ; dieser letzte Parameter ist der veränderlichste *Parameter* im Laufe des Kulturwachstums. Aufgrund der Entwicklung der einfallenden Strahlungen im Laufe des Jahrs auf zwei Standorten (Versailles 48° Nord, 2° Ost ; Gouadeloupe 16° Nord, 62° West) und der mittleren Eigenschaften (Entwicklung von F, Blattneigung...) für verschiedenen Arten (Mais, Ackerbohne, Winterweizen, Luzerne in Versailles ; Zuckerrohr, Süsskartoffel, *Vigna sinensis* in Gouadeloupe) wird die Leistungsfähigkeit dieser Kulturen für die Länge des Entwicklungszyklus und für das Jahr (Tafel 8) berechnet. Diese Kulturen fangen ziemlich gut die Energie ein und zeigen ziemlich ähnliche Leistungsfähigkeiten ($\varepsilon_{i\ vis} = 0{,}50$ zu $0{,}70$), wenn nur die Periode Saat-Ernte betrachtet wird. Auf Jahresebene variiert ε_i viel mehr und hängt zugleich von der Verteilung der einfallenden Strahlungen und der Lage des Zyklus im Laufe des Jahrs ab. Die folgenden Beziehungen werden beobachtet :

$$\varepsilon_{i\ vis}\ \text{annuel} = -0{,}95\ G\tau/Ga - 0{,}95$$
$$\varepsilon_{i\ tot}\ \text{annuel} = -0{,}73\ G\tau/Ga - 0{,}72$$

in denen $G\tau$ die Gesamtstrahlung während der Perioden mit keinem oder schwachem Abfangen ($\varepsilon_i < \varepsilon_{i\ max}$ Abb 2 ; vor der Saat, nach der Ernte, Verwurzelung und Alterung der Vegetation) und Ga die jährliche Gesamtstrahlung ist.

РЕЗЮМЕ

Применение законов излучения в рассеивающей среде, к растительному покрову.

I. Перехватывание солнечной энергии культурой.

Варле-Гранше К., Бономм Р.

В пред'идущей работе (Бономм и Варле-Гранше 1977 б), при изучении обмена излучений культурой, нами применялся закон Кубелки - Мунка Этот-же метод применяется и в данной работе, для вычисления солнечной энергии поглощенной растительным покровом, и для определения эффективности перехватывания им общего солнечного излучения ($\varepsilon_{i\text{общ}}$ = солнечная энергия поглощенная культурой/сумма побочных излучений) и видимых излучений ($\varepsilon_{i\text{вид.}}$ = видимая поглощенная энергия/видимая побочная энергия). Законность этого подхода тестировалась сравнением (Рис. 2) между эволюцией ежедневных значений $\varepsilon_{i\text{вид.}}$ и $\varepsilon_{i\text{общ.}}$, рассчитанных этим способом, в зависимости от листового показателя F, и значениями полученными при измерениях (Рис. 1), проведенных на культуре сахарного тростника с известными характерностями (Табл. 2). Затем обсуждаются гипотезы (Табл. 1) применения этого рода рассчета, основанные на структуре растительного покрова (Табл. 5, 6 и 7).

Эти модели служат затем для изучения действия наклона листа (Рис. 3) и оптических свойств почвы (Рис. 4) и листьев (Рис. 5) на перехватывание излучений. Оптические свойства листьев и листовой показатель, - параметр наиболее изменчивый в течении развития культуры, оказались наиболее сильно влияющими факторами. Основываясь на эволюции побочных излучений в течении года в двух определенных пунктах (Версаль : 48° северной широты и 2° восточной долготы, Гваделупа : 16° северной широты и 62° западной долготы) и на средних характеросях (эволюция F, наклон листьев) различных видов растений (кукуруза, конские бобы, пшеница и люцерна в Версале ; сахарный тростник, батат, вигна на Гваделупе) рассчитывается эффективность этих культур в течении цикла их развития и за год (Табл. 8). Все эти культуры оказались довольно хорошими перехватчиками энергии и эффективность их была почти одинакова ($\varepsilon_{i\text{вид.}}$ 0,50 — 0,70) в течении периода посев — сбор урожая. ε_i изменяется гораздо больше за год и зависит его величина в этом случае, как от распределения побочных излучений, так и от длительности цикла растения в году.

Получены соотношения : $\varepsilon_{i\text{вид.}}$ за год $= -0{,}95\ G\tau/Ga - 0{,}95$ и
$\varepsilon_{i\text{общ.}}$ за год $= -0{,}73\ G\tau/Ga - 0{,}72$

в которых $G\tau$ представляет общее излучение, полученное в период полного отсутствия перехватывания, или слабого перехватывания ($\varepsilon_i < \varepsilon_{i\text{макс.}}$ рис. 2 ; перед посевом, после сбора урожая, во время насаждения и старения растительности) и Ga — обще излучение за год.

Références bibliographiques

ACOCK B., THORNLEY J. H. M., WILSON W. J., 1969. Spacial variation of light in the canopy. In : *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. Proc. IBP/PP Techn. Meet. Trebon. Center for Agric. Publ. and Doc. Wageningen, 91-102.

ALLEN W. A., RICHARDSON A. J., 1968. Interaction of light with a plant canopy. *J. Opt. Soc. Am.*, **58,** 1023-1028.

ANDERSON M. C., 1969. A comparison of two theories of scattering of radiation in crops. *Agri. Meteorol.*, **6,** 399-405.

ANDERSON M. C., 1971. Radiation and crop structure. In : *Plant photosynthetic production, Manual of methods*, Junk, The Hague.

BAILLE A., GUICHERD R., MERMIER M., 1978. Le pyranomètre sélectif : Etude de ses possibilités d'utilisation dans le domaine agronomique et dans celui de la pollution atmosphérique. *Ann. agron.*, **29** (1), 59-78.

BLAD B. L., BAKER D. G., 1972. Orientation and distribution of leaves within soybean canopies. *Agron. J.*, **64,** 26-29.

BONHOMME R., 1969. Microclimat lumineux dans une culture de Patate douce ; incidence sur la photosynthèse. *Proceed. Caribbean Food Crops Society, 7th Ann. Meet. Martinique*, Guadeloupe, 279-293.

BONHOMME R., 1976. Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites *in situ*. *Ann. agron.*, **27** (1), 33-59.

BONHOMME R., CHARTIER P., 1972. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Israël J. Agric. Res.*, **22** (2), 53-61.

BONHOMME R., VARLET GRANCHER C., CHARTIER M. ARTIS P., 1977*a*. Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis*. IV. Influence de l'âge et des éclairements passés sur le potentiel photosynthétique des feuilles cotylédonnaires. *Ann. agron.*, **28** (2), 159-169.

BONHOMME R., VARLET GRANCHER C., 1977*b*. Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. I. Etablissement des lois et vérifications expérimentales. *Ann. agron.*, **28** (6), 567-582.

BONHOMME R., VARLET GRANCHER C., 1978. Estimation of gramineous crop geometry by plants profiles including leaf with variations. *Photosynthetica*, **12** (2), 193-196.

CHARTIER P., 1966. Etude du microclimat dans la végétation. *Ann. agron.*, **17,** 571-602.

CHARTIER P., 1969. Assimilation nette d'une culture couvrante. I. Détermination de l'assimilation nette de la culture à partir d'une analyse théorique. *Ann. Physiol. Veg.*, **11** (2), 123-159.

CHARTIER P., 1975. L'assimilation du CO_2 à l'échelle de la feuille et à celle de la culture. In : *Photosynthèse et Production végétale*. Ed. by C. Costes, Gauthier-Villars, 171-191.

COMBRES J. C., BONHOMME R., BALDY C., GOILLOT C., DE PARCEVAUX S., 1970. Un pyranomètre linéaire destiné à mesurer le rayonnement sous couvert végétal. In : *Techniques d'Etude des facteurs physiques de la biosphère*. I.N.R.A., Paris, 59-70.

COWAN I. R., 1968. The interception and absorption of radiation in plant stands. *J. Appl. Ecol.*, **5,** 367-379.

ECKARDT F. F., HEIM G., METHY M., SAUGIER B., SAUVEZON R., 1971. Fonctionnement d'un écosystème au niveau de la production primaire. Mesures effectuées dans une culture d'*Helianthus annus*. *Oecol. Plant.*, **6,** 51-100.

FUCHS M., 1972. The control of the radiation climate of plant communities. In : *Optimizing the soil physical environment toward greater crop yields*. Ed. by D. Hillel, Academic Press, New York, 173-191.

GAASTRA P., 1958. Light energy conversion in field crops in comparison with the photosynthetic efficiency under laboratory conditions. *Medelingen Landbouwhougeschool. Wageningen*, **58,** 1-12.

GAUSSMAN H. W., ALLEN W. A., ESCOBAR D. E., RODRIGUEZ R. R., GARDENAS R., 1971. Age effects of cotton leaves on light reflectance, transmittance and absorptance and on water content and thickness. *Agron. J.*, **63,** 465-469.

GAUSSMAN H. W., ALLEN W. A., WIEGAND C. L., ESCOBAR D. E., RODRIGUEZ R. R., RICHARSON A. J., 1973. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra and optical and geometrical parameters. *Agric. Research Ser. U.S.D.A. Texas Agric. Exp. Stn., Tec. Bull.* 1465, 59 p.

HODANOVA D., 1972. Structure and development of sugar beet canopy. I. Leaf area, leaf angle relations. *Photosynthetica*, **6** (4), 401-409.

IDSO S. B., JACKSON R. D., REGINATO R. J., KIMBALL B. A. NAKAYAMA F. G., 1975. The dependance of bare soil albedo on soil water content. *J. Appl. Meteorol.*, **14** (1), 109-113.

ISOBE S., 1969. Theory of the light distribution and photosynthesis in canopies of randomly dispersed foliage area. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci.*, Ser. A., **16,** 1-25.

ITO A., UDAGAWA T., UCHIJIMA Z., 1973. Phytometrical studies of crop canopies. II. Canopy structure of rice crops in relation to varieties and growing stage. *Procee. of the Crop Sci. Soc. of Jap.*, **42,** a, 334-342.

KATERJI N. B., 1977. *Contribution à l'étude de l'évapotranspiration réelle du blé tendre d'hiver. Application à la résistance du couvert en relation avec certains facteurs du milieu.* Thèse Docteur Ing. Université Paris VII.

KNIPLING E. B., 1970. Physical and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote sens of Environment*, **1,** 155-159.

KUBELKA P., MUNK F., 1931. Ein Beitrag zur optik der Farblanstriche. *Z. Techn. Physik.*, **12,** 593-601.

KYLE W. J., DAVIES J. A., 1974. Quantitative comparaison of foliage display in two plots of corn., *Canad. J. Bot.*, **52** (12), 2465-2471.

LEDENT J. F., 1974. *Plant geometry, canopy architecture and leaf angle in wheat.* Ph. D. University of Minesota. Agronomy.

LEMEUR R., 1973. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, jerusalem artichoke corn and soybean canopies using actual stand structure data. *Agric. Meteorol.* **12,** 229-247.

LEMEUR R., BLAD B. L., 1974. A critical review of light models for estimating the shortware radiation regime of plant canopies. *Agric. Meteorol.*, **14,** 255-286.

LOOMIS R. S., WILLIAMS W. A., 1963. Maximum crop productivity : An estimate. *Crop Sci.*, **3,** 67-72.

MONTEITH J. L., 1972. Solar radiation and Productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, **9,** 747-766.

MONTEITH J. L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.* (N-S), **29,** 17-37.

MONSI M., SAEKI T., 1953. Uber den lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Beteutung fur die stoff production. *Jap. J. Bot.*, **14,** 22-52.

NICHIPOROVICH A. A., 1961. Properties of plant crop as an optical system. *Sov. Plant Physiol.*, **8,** 428-435.

NICHIPOROVICH A. A., STOGONOVA L. E., 1957. Photosynthesis and problems of cropfield. *Agrochimica*, **2,** 26-53.

REBELLA C., 1975. *Reflexion de l'énergie solaire par une culture de maïs en fonction de sa biomasse. Application à la surveillance de zones de grandes cultures par télédétection.* Thèse de l'Université. Paris VI, 99 p.

ROSS Y. K., NILSON T., 1967. The vertical distribution of biomass in crop stands. In : *Photosynthesis of productive systems.* Ed. by Nichiporovich A. A., Israel Prog. for Sci. Transl. Ed. by Monteith J. L. Jerusalem.

SCOTT D., WELLS J. S., 1969. Leaf orientation in Barley, Lupin and Lucerne stands. *New Zealand J. Bot.*, **7,** 372-388.

SINCLAIR R., THOMAS D. A., 1970. Optical properties of leaves of some species in arid south australia. *Aust. J. Bot.*, **18,** 261-273.

SURAQUI S., 1972. Spectral measurements of global radiation. *Israel J. agric . Res.* **22** (2), 119-125.

UDAGAWA I., UCHIJIMA Z., HORRIE T., KOBAYASHI K., 1967. Canopy structure of corn plant. In : *Photosynthesis and utilization of solar energy* J.I.B.P./P.P. Level III experiment 1966-67, 20-24.

VARLET GRANCHER C., 1974. Assimilation Nette, Utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. V. Evolution de la quantité et de la qualité de la lumière solaire réfléchie par la culture à différents stades. *Ann. agron.*, **25** (6), 797-810.

VARLET GRANCHER C., ARTIS P., BONHOMME R., 1971. Increase of leaf area Index and photosynthetic test in various sweet potato crops. *9th Ann. Meet. of Caribbean Food Crops Society.* 13-19 June Guyana.

VARLET GRANCHER C., BONHOMME R., 1974. Utilisation de l'énergie solaire par une culture de Vigna sinensis. III. Evolution du rendement énergétique pendant la phase végétative. *Ann. agron.*, **25** (6) 811-819.

VARLET GRANCHER C., BONHOMME R., LEAL CASTANEDA P., 1976. Rendimiento energetico de un cultivo de cana de azucar. *Turrialba*, **26** (2), 139-143.

VARLET GRANCHER C., BONHOMME R., CHARTIER P., 1978. Efficiency of sugar cane and cowpea as solar energy converters. *International Solar Energy Congress*, New Dehli, 13 p. sous-presse.

WARREN WILSON J., 1960. Inclined point quadrats. *New Phytol.*, **59,** 1-7.

WESTLAKE D. F., 1963. Comparisons of Plant productivity. *Bid. Rev.*, **38,** 385-425.

Annexe 1

Valeurs de la fonction d'extinction du rayonnement solaire direct $K = K(i, h)$ *pour différentes inclinaisons des feuilles* i *et hauteurs du soleil* h

$$K(i, h) = \cos i \quad \text{si} \quad i \leqslant h$$

$$K(i, h) = \frac{2 \cos h . \sin i \sin m - \cos i \sin h(\Pi - 2 m)}{(\Pi \sin h)}$$

$$\text{si} \quad i > h \quad \text{avec} \quad m = \text{arc cos} (- \text{tg } h/\text{tg } i)$$

i (deg)		0	5	15	25	35	45	55	65	75	85
h (deg)	5	1,000	0,996	1,985	3,129	4,206	5,165	5,972	6,600	7,031	7,249
	15	1,000	0,996	0,966	1,175	1,464	1,741	1,981	2,170	2,301	2,367
	25	1,000	0,996	0,966	0,906	0,964	1,072	1,178	1,267	1,329	1,361
	35	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,808	0,836	0,868	0,894	0,907
	45	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,656	0,641	0,637	0,637
	55	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	0,597	0,462	0,447
	65	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	p,423	0,335	0,301
	75	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	0,423	0,259	0,179
	85	1,000	0,996	0,966	0,906	0,819	0,707	0,574	0,423	0,259	0,087

Annexe 2

Valeurs de la fonction d'extinction du rayonnement solaire diffus du ciel K' *pour différentes inclinaisons des feuilles* i (*Bonhomme, Varlet Grancher*, 1977)

i (deg)	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85
K'	1,00	1,00	0,97	0,93	0,87	0,81	0,81	0,73	0,57	0,49

Annexe 3

Expression des constantes utilisées dans les calculs

$$C_5 = - \{ (C_7 + C_8) [a_\lambda(1 + \alpha) - (1 - \alpha)] e^{-\alpha F} + (1 + \alpha) (C_9 - a_\lambda C_7 - a_\lambda S_{\lambda_0}) e^{-KF} + (1 + \alpha) (C_{10} - a_\lambda C_8 - a_\lambda D_{\lambda_0}) e^{-K'F} \}/\Delta$$

$$C_6 = \{ (C_7 + C_8) [a_\lambda(1 - \alpha) - (1 + \alpha)] e^{\alpha F} + (1 - \alpha) (C_9 - a_\lambda C_7 - a_\lambda S_{\lambda_0}) e^{-KF} + (1 - \alpha) (C_{10} - a_\lambda C_8 - a_\lambda D_{\lambda_0}) e^{-K'F} \}/\Delta$$

avec :

$$\Delta = (1 + \alpha)^2 e^{\alpha F} - (1 - \alpha)^2 e^{-\alpha F} - a_\lambda(1 - \alpha^2) (e^{\alpha F} - e^{-\alpha F})$$

$$C_7 = KS_{\lambda_0} R_\lambda(1 + K)/\Delta_1$$
$$C_8 = K'D_{\lambda_0} R_\lambda(1 + K')/\Delta_2$$
$$C_9 = KS_{\lambda_0} R_\lambda(1 - K)/\Delta_1$$
$$C_{10} = K'D_{\lambda_0} R_\lambda(1 - K')/\Delta_2$$

avec :

$$\Delta_1 = \alpha^2 - K^2$$
$$\Delta_2 = \alpha^2 - K'^2$$

Ann. agron., 1979, **30** (1), 27-51.

Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*

P. STENGEL

avec la collaboration technique de M. BOURLET, R. DARTHOUT et J. HOROYAN

Station de Science du Sol
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I. N. R. A.,
Domaine St-Paul
84140 *Montfavet*

Résumé

L'intérêt de la distinction entre porosités texturale et structurale pour caractériser l'état physique du sol est discuté à partir des résultats obtenus sur un essai de simplification du travail du sol.

Cette critique souligne les limites inhérentes aux techniques classiques de mesure de la porosité totale, fondées sur des mesures de volume apparent.

Dans le sol limono-argileux de l'essai, la porosité mesurée sur de petits agglomérats naturels dépend essentiellement de la constitution minérale et organique du matériau et de sa teneur en eau. Elle peut donc être assimilée à la porosité texturale.

L'évaluation de la porosité structurale apparaît comme un meilleur moyen de comparer des états structuraux différents que la simple mesure de la porosité totale, quand la teneur en eau et/ou la constitution du sol sont variables. Pour aborder le déterminisme de la porosité structurale en sol non travaillé, il reste à distinguer les effets de l'activité biologique de ceux de l'« histoire » hydrique.

I. — Introduction

La caractérisation de l'espace poral du sol a le plus fréquemment pour objectif de prévoir son comportement hydrodynamique ou d'en rendre compte. A partir d'un comportement constaté — rétention ou circulation de l'eau, dispersion hydrodynamique d'un soluté — et d'un modèle de l'espace poral, on évalue alors les paramètres descriptifs de ce modèle. C'est le cas, par exemple, du rayon équivalent des pores quand on utilise le modèle capillaire.

Lorsqu'on cherche à prévoir l'évolution de cet espace poral dans les sols en place une autre méthode apparaît *a priori* plus adéquate. Elle consiste à s'efforcer de distinguer, dans le volume total des pores, différentes fractions ou sous-ensemble de pores, résultant chacun de l'action d'un des facteurs de variation de ce volume. En d'autres termes, il s'agit de *classer les pores suivant leur origine*.

Dans un premier temps, on peut définir deux grands groupes de facteurs de variation de la porosité du sol :

— La constitution (granulométrique, minéralogique, organique) dont résulte l'assemblage des particules élémentaires du sol et par conséquent un ensemble, ou système de porosité, qu'on peut qualifier de textural.

— L'histoire, c'est-à-dire l'action des facteurs externes — climatiques, biologiques, mécaniques — sur le matériau. Celle-ci est à l'origine d'un second système de porosité qualifié de structural.

Les deux termes de cette analyse semblent avoir été définis pour la première fois par Childs (1969) qui les a nommés respectivement « textural pore space » et « structural pore space ».

S'intéressant au comportement hydrodynamique, il considérait la distinction comme essentiellement morphologique, la relation avec l'origine des pores n'étant qu'implicite dans son texte. Il l'opposait en particulier à la « division arbitraire en micro- et macro-porosité ».

L'idée n'a apparemment suscité que peu d'échos. La distinction entre deux types de pores s'effectue encore le plus souvent à partir d'un seuil de dimension équivalente, choisi plus ou moins arbitrairement (Thomasson, 1978, par exemple). Cette attitude est contradictoire avec la conclusion que Childs apportait à sa discussion sur l'analyse de la porosité : « la valeur (de cette analyse) repose sur la capacité de déterminer et d'évaluer quantitativement l'importance relative des deux types d'espace poral et de donner ainsi un sens à la description ».

Nous avons, quant à nous, proposé dans un article antérieur (Monnier *et al.*, 1973) une méthode permettant d'évaluer la porosité texturale d'échantillons naturels, en l'assimilant à la porosité mesurée sur de petits volumes extraits par tamisage. La porosité structurale étant calculée par la différence :

$$n^s = n^T - n^t$$

n^s = porosité structurale
n^T = porosité totale
n^t = porosité texturale

} exprimées par rapport au volume apparent du sol en place.

Il devenait ainsi possible de pratiquer l'analyse des systèmes de porosité sur des matériaux naturels.

Nous l'avons appliquée à la caractérisation des effets physiques de la simplification du travail du sol en rotation céréalière et nous avons présenté récemment les éléments de jugement qu'elle a fournis au sujet des nouvelles techniques culturales étudiées (Stengel, 1976 ; Monnier *et al.*, 1976).

Au-delà de cette information à finalité agronomique, l'acquisition d'un nombre important de données sur des matériaux naturels constitue un moyen de critique et d'évaluation méthodologiques de l'analyse des systèmes de porosité : c'est là l'objet de ce mémoire.

Cette critique doit porter sur :

— Les principes et la précision des techniques de mesures employées,

— La définition des concepts : la classification des systèmes de porosité a évidemment un caractère schématique. En particulier l'organisation des particules élémentaires d'un matériau se met en place au cours d'un processus physique, qui fait partie de son histoire, et dont la porosité texturale ne peut pas être rigoureusement indépendante. Comme le dit Bouma (1977) : « les deux (systèmes de porosité) semblent irrévocablement liés ». Il est donc nécessaire de préciser ce degré de schématisation.

— La valeur opérationnelle de l'analyse : il s'agit d'évaluer son intérêt pour la compréhension et la prévision de l'évolution de l'état physique du sol. Dans ce domaine, les références et les modèles de variation existants concernent la porosité texturale (Fiès, 1971 : Fiès *et al.*, 1972). Ils ont été acquis par voie expérimentale, à partir d'échantillons préparés dans des conditions standards et ne prennent en compte qu'un nombre nécessairement réduit de caractéristiques de constitution. Il faut donc tester leur valeur prévisionnelle pour les matériaux naturels et utiliser les caractéristiques de ces derniers pour proposer l'introduction éventuelle de nouvelles variables. Il s'agit enfin d'aborder la prévision de la porosité structurale.

II. — Origine des échantillons

2.1. — *Dispositif expérimental*

La plupart des mesures dont les résultats sont présentés ici ont été pratiquées sur des échantillons prélevés dans un essai de simplification du travail du sol implanté en 1971 par l'I.T.C.F. à Boigneville (Essonne). La description détaillée du dispositif expérimental a été publiée par ailleurs (Bodet *et al.*, 1976). Nous en rappellerons brièvement les traits principaux.

L'ensemble de l'essai porte un assolement blé-maïs. Pour chacune de ces cultures, trois ensembles de techniques culturales sont mis en comparaison :

— L_0 labour à 25 cm et reprise par des instruments à dents.

— L_1 travail superficiel (7-8 cm) à la houe rotative.

— L_2 semis direct. Seule la ligne de semis est travaillée par le soc ou la fraise du semoir. Tous les résidus de récolte restent à la surface du sol.

Ces techniques sont répétées chaque année sur une même parcelle. Deux dispositifs identiques sont juxtaposés : l'un avec irrigation, l'autre sans. L'ensemble couvre une superficie d'environ 8 ha.

2.2. — *Choix des sites et dates de mesures*

Les mesures et prélèvements ont été effectuées dans les interlignes, à deux profondeurs : 0-7 cm et 8-15 cm. Les roulages des matériels de culture étant répétés toujours aux mêmes endroits, nous avons pu nous placer systématiquement hors des traces de roues.

Les campagnes de mesures ont eu lieu chaque année dans les semaines suivant la récolte du maïs (15/9 au 15/11).

2.3. — *Caractéristiques du sol*

Le sol de l'essai est un limon loessique, d'une épaisseur de l'ordre du mètre, reposant sur un substratum calcaire (molasse du Gâtinais). Notons parmi les caractéristiques physiques du profil, important pour une éventuelle extrapolation des résultats qui vont suivre, sa bonne perméabilité.

La composition moyenne de l'horizon superficiel (0-30 cm) figure au tableau 1. L'argile a une capacité d'échange moyenne de 50 meq/100 g. Une estimation de sa composition minéralogique est donnée au tableau 2.

TABLEAU 1

Composition moyenne de l'horizon superficiel
Average physical and chemical characteristics of the soil

Composition granulométrique (p. 100)					Carbone organique p. 1000	Carbonates
< 2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ		
23,4	29,7	36,9	6,9	2,0	9,9	traces

Capacité d'échange (meq/100 g)			
T	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^{+}
13,4	Saturé	0,67	0,15

TABLEAU 2

Estimation de l'abondance des différents minéraux de la fraction 0-2 μ (notées de 1 à 6)
Composition of the clay fraction (quantities of different minerals are expressed on a scale from 1 to 6)

Silice	Goethite	Kaolinite	Illite	Vermiculite	Montmorillonite
2	(1)	4	4	2	(1)

III. — Techniques de mesures

3.1. — *Porosité totale d'une couche de sol*

La porosité totale a été évaluée à partir de mesures de la densité de sol en place $^{D}\bar{\gamma}_{d}$ par la technique du densitomètre à membrane. Celle-ci pose les problèmes méthodologiques communs à toutes les techniques dont le principe est la mesure d'un volume encombré ou volume apparent.

3.1.1. *Cas d'une couche de sol d'état physique homogène.*

Pour simplifier la discussion, assimilons schématiquement la porosité d'une couche de sol à un ensemble de réseaux de pores, caractérisés par la dimension de ces pores

et les « mailles » des différents réseaux (fig. 1). On ne peut évaluer correctement cette porosité par une mesure portant sur un volume choisi de façon aléatoire au sein de cette couche, que si ce volume est grand par rapport à la « maille » du réseau poreux le plus grossier.

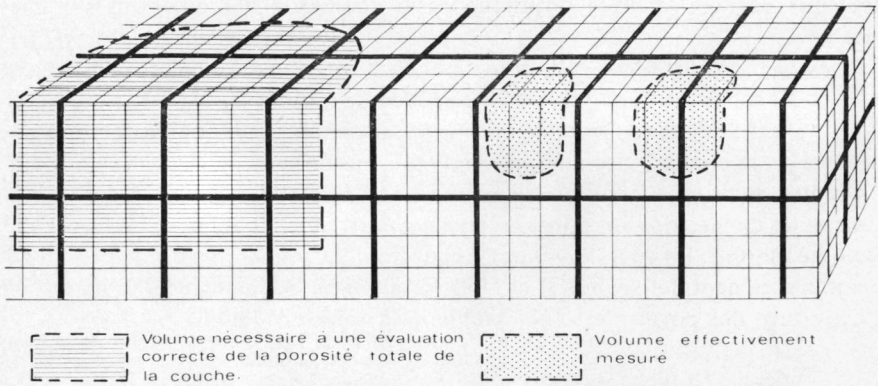


FIG. 1. — *Relation entre la « maille » des réseaux de pores et le volume nécessaire à la mesure de porosité totale.*

Relationship between size of structural units and the volume to be measured for correct evaluation of total porosity.

Il apparaît immédiatement que, dans de nombreux cas, cette condition ne peut être satisfaite pour des raisons techniques : les réseaux de fissures les plus grossiers de certains sols argileux, par exemple, ont des « mailles » de plusieurs dizaines de cm. On ne peut donc apprécier valablement la porosité totale que par la moyenne de plusieurs mesures portant sur des volumes plus petits que cette maille. Toute diminution du volume de mesure a pour conséquence un accroissement de la dispersion des résultats. C'est par un phénomène de cette nature que s'explique la différence des

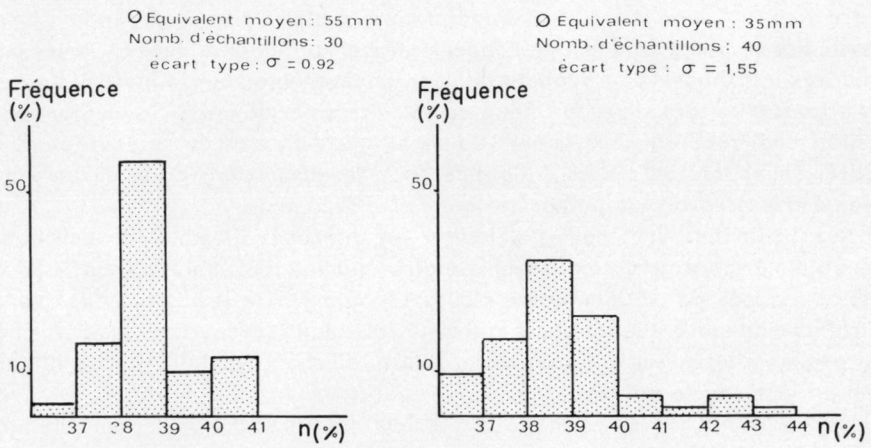


FIG. 2. — *Influence du découpage par volumes décroissants d'une population de mottes sur la distribution des porosités mesurées* (n p. 100) *par saturation au pétrole.*

Influence of the size of soil fragments taken from the same sample on the distribution of porosities. Frequency (p. 100) — n : *porosity* (p. 100).

distributions de la porosité mesurée sur des volumes moyens décroissants, obtenus par découpages successifs d'une même population de grosses mottes (fig. 2). On constate également que la distribution obtenue n'est pas nécessairement gaussienne et qu'il peut être difficile de la caractériser statistiquement : ceci ne pourraît être fait rigoureusement que par une analyse statistique de la géométrie des différents systèmes de pores.

Il deviendrait possible, à cette condition, d'évaluer la part de la dispersion expérimentalement constatée qui est due à l'incertitude de mesure au sens strict. On l'ignore actuellement et l'on est contraint de la considérer comme négligeable par rapport à la variabilité de la porosité des différents volumes mesurés.

D'autre part, la diminution du volume de l'échantillon rencontre une limite : il faut que les dimensions des pores les plus grossiers soient petites par rapport à celles du volume mesuré. En effet, le volume apparent d'un solide poreux quelconque n'est pas rigoureusement défini (fig. 3) et l'indétermination de la surface-limite au niveau de l'ouverture des pores n'est négligeable qu'à cette condition.

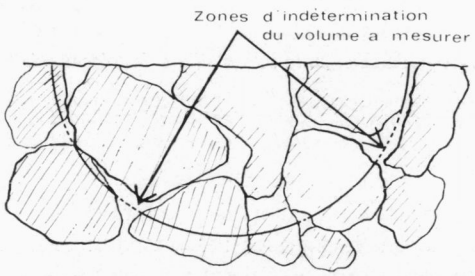


FIG. 3. — *Schéma illustrant la nécessité de la relation entre dimension des pores et dimension du volume mesuré.*

Illustration of the relationship between size of pores and the volume to be measured.

Dans le cas particulier du densitomètre à membrane, le volume mesuré est de l'ordre du dm^3. On ne saurait le considérer comme grand par rapport à la « maille » de systèmes de pores séparant les éléments structuraux de plusieurs cm créés par de nombreux instruments de travail du sol. Il en est de même pour la taille des pores les plus grands et ce sont, de ce fait, les propriétés de déformation de la membrane et la pression appliquée qui déterminent au moins partiellement le contour du volume mesuré. Telles sont les causes de la différence des dispersions de la porosité en sol travaillé et non travaillé (fig. 4) présentées à titre d'exemple.

Aux limitations précédentes s'ajoutent les difficultés d'emploi du densitomètre dans un matériau fraîchement travaillé ou très humide, déformable sous l'effet de la pression exercée par la membrane (200 à 400 g/cm^2). De leur fait, nous avons été contraints d'attendre que les couches travaillées soient devenues moins déformables pour pratiquer les mesures. C'est une des raisons du choix des dates d'échantillonnage fixées en fin du cycle cultural.

Une telle attitude ne permet pas d'établir des relations entre état physique et fonctionnement du système poreux vis-à-vis de l'eau et des racines, au cours du développement de la culture. Le développement des recherches sur les conséquences physiques du travail du sol dépend donc en premier lieu de l'acquisition de nouvelles techniques de mesure.

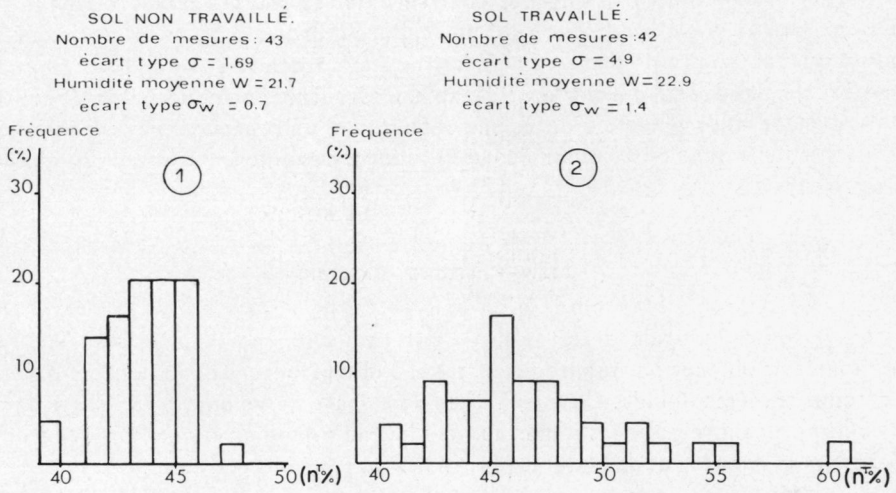


FIG. 4. — *Distribution des porosités mesurées* (n^T).

Distribution of total porosity (n^T p. 100). 1. — *Direct drilling*. 2. — *Plowing*.

3.1.2. *Hétérogénéités de l'état physique.*

L'état physique d'une couche superficielle dans une parcelle cultivée ne peut être caractérisé par une valeur unique de la porosité, même assortie d'un paramètre de dispersion. En effet, on y rencontre généralement différents états structuraux dont l'importance relative et la répartition dans l'espace sont des éléments essentiels de la description de cet état physique. C'est le cas, par exemple, des zones roulées et non roulées. On voit au tableau 3 que l'effet du roulage est différent sur les couches travaillées et non travaillées. On ne peut donc caractériser la variation d'état physique consécutive au travail du sol sans tenir compte de l'hétérogénéité liée au roulage.

TABLEAU 3

Effet des passages de roue sur la porosité totale (p. 100) *en sol travaillé et non travaillé*

Total porosity out of wheel track (1) *and under wheel track* (2) — *plowing* (*a*) *and direct drilling* (*b*)

Profondeur	Traitement	Hors roue (1)	Sous roue (2)
0-7 cm	travail (*a*)	52,5	47,1
	non travail (*b*)	48,0	46,8
8-15 cm	travail (*a*)	50,3	46,5
	non travail (*b*)	42,7	43,7

Il peut exister dans une parcelle cultivée d'autres sources d'hétérogénéité : la différence entre ligne et interligne dans une culture à grand écartement par exemple. On voit que le nombre de mesures nécessaires à la caractérisation de l'état physique d'une couche de sol peut devenir considérable. Ces mesures ne pourront être réalisées et interprétées efficacement qu'après une définition et un repérage par une technique plus rapide, telle que l'observation du profil cultural des différentes situations à caractériser.

3.2. — *Porosité texturale*

La porosité texturale a été mesurée par saturation partielle, dans le pétrole, d'agglomérats obtenus par tamisage entre 2 et 3 mm et mesure de la poussée d'Archimède dans le même liquide. Cette technique de mesure du volume ne présente pas de difficulté particulière pour les matériaux étudiés ici (Monnier *et al.*, 1973). Il en irait différemment dans le cas de textures plus riches en éléments grossiers.

3.2a. *Echantillons naturels.*

Le principe de l'assimilation de la porosité de petits volumes n_τ à la porosité texturale sera discuté au paragraphe suivant.

3.2b. *Echantillons remaniés.*

Ces échantillons ont été préparés de façon à :

— éliminer la porosité structurale,

— mettre en place l'organisation texturale dans des conditions aussi standardisées que possible.

Le protocole est dérivé de celui mis au point par Kheyrabi (1968) et employé par Fiès (1971). Il comporte :

— un malaxage (environ 10 mn) de l'échantillon tamisé à 2 mm en présence d'une quantité d'eau égale à 1,9 fois son humidité équivalente,

— une période de repos de 24 h,

— un second malaxage,

— un ressuyage par le vide de la trompe à eau (5 h),

— séchage à l'atmosphère du laboratoire puis à l'étuve à 105° C.

Les éprouvettes ainsi obtenues sont ensuite brisées et tamisées entre 2 et 3 mm, et la densité $\overline{\gamma}^{t}_{dd}$ des agglomérats obtenus mesurée par la technique au pétrole.

3.3. — *Expression des résultats*

Les grandeurs mesurées et l'expression des différentes grandeurs calculées sont rassemblées à l'annexe I.

IV. — Validité de la notion de porosité texturale

4.1. — *Matériaux secs*

L'arrangement des particules élémentaires constitutives d'un sol, donc la porosité qui en résulte, ne peut être indépendant des conditions physiques et mécaniques qui lui ont été imposées, en particulier de son « histoire » hydrique. On peut cependant considérer qu'une couche de sol subit, sous un climat donné, un régime de contraintes engendrées par les changements d'humidité, régime qui varie peu au cours du temps. On peut alors admettre qu'il s'établit dans l'organisation des particules un état d'équilibre qui ne dépend que de la constitution du matériau au moins à l'état sec, caractérisé par une porosité texturale également peu variable.

Les résultats du tableau 4 sont en accord avec cette hypothèse. Des mesures de porosité d'agglomérats de 2-3 mm secs, n'^{τ}_{d}, pratiquées à trois dates différentes (c'est-à-dire à des humidités de prélèvements et après des « histoires » hydriques différentes) donnent des résultats très voisins pour chacun des sites de mesures, correspondant à une même constitution. Exprimées par rapport au volume apparent de la couche de sol considérée, ces variations sont au maximum de l'ordre de 1,5 p. 100.

TABLEAU 4

Porosité texturale à l'état sec n'^{τ}_{d} (p. 100) *mesurée à différentes dates en plusieurs points de l'essai (profondeur 7-15 cm). Ecart type d'un résultat* $\sigma = 0{,}1$

Variations of dry textural porosity (p. 100) *with time in different sites of field plots*

N° du site	Octobre 1974	Octobre 1975	Septembre 1976
1	32,6	32,9	33,6
2	32,1	32,2	32,4
3	33,4	33,8	34,4
4	32,8	33,3	33,2
5	30,9	31,6	32,4
6	33,4	33,9	34,2
7	32,4	32,2	33,5
8	31,9	31,6	33,8

Elles atteignent cependant parfois le seuil de la signification statistique. C'est le cas de certaines valeurs de 1976 par rapport aux deux années précédentes.

Nous devons alors comparer l'amplitude de ces variations à celles de la fraction complémentaire de la porosité, c'est-à-dire la différence

$$n^{T} - n^{\tau}_{d},$$

n^{T} étant la porosité totale,

n^{τ}_{d} la porosité d'agglomérats secs, ramenée au volume apparent de la couche de sol.

Pour une couche de sol dont le volume total varie peu avec l'humidité, elle représente la « porosité structurale potentielle », c'est-à-dire la porosité structurale de cette couche à l'état sec.

Elle est calculée à partir de la relation :

$$n^T - n_d^\tau = 100 \left(1 - \frac{D\overline{\gamma}_d}{\overline{\gamma}_{dd}^\tau}\right).$$

On voit (tabl. 5) que, pour un même matériau, et suivant son état physique, l'amplitude de variation de cette dernière variable est très supérieure à celle de la porosité texturale.

TABLEAU 5

Variation de la différence $n^T - n_d^\tau$ (p. 100 *du volume apparent*) *avec l'état physique pour une porosité texturale à l'état sec* n_d^τ *constante* (n^T = *porosité totale* ; n_d^τ = *porosité texturale à l'état sec exprimée en* p. 100 *du volume apparent de la couche de sol*)

Variations of the difference $n^T - n_d^\tau$ (p. 100 *bulk volume*) *with physical state of soil,* n_d^τ *being a constant* (n^T = *total porosity* ; n_d^τ = *dry textural porosity in* p. 100 *of the bulk volume*)

Fraîchement travaillé	Plusieurs mois après travail		Non travaillé
	Non roulé	Roulé	
49,5	30,2	22,2	15,3

On est donc fondé à considérer en première approximation la porosité texturale à l'état sec comme une constante, pour un matériau donné.

Notons que dans le cas présent, nous avons constaté la stabilité de la porosité texturale à l'état sec, bien que les matériaux considérés aient subi, outre les contraintes hydriques résultant de l'interaction climat-constitution, des contraintes mécaniques liées aux techniques culturales.

Quant à l'action de ces dernières, l'expérience a montré que pour ces matériaux, l'application de contraintes beaucoup plus élevées que celles qui sont développées par les matériels de culture était nécessaire pour provoquer un tassement de l'organisation texturale acquise *in situ*. En effet, il n'apparaît pas de tassement textural même par compactage à l'énergie du test Proctor standard (6 kg $\times$ cm/cm^3) dont les effets sont pourtant très supérieurs à ceux du roulage par les engins agricoles par exemple (Stengel et Faure, 1977).

La faible sensibilité de cette organisation à une large gamme de contraintes est confirmée par l'identité constatée des porosités à l'état sec d'agglomérats prélevés sous les traces de roues et hors des traces de roue.

4.2. — *Influence de l'humidité*

La comparaison de l'importance relative des deux types de porosité, pour évaluer l'effet d'un facteur physique déterminé, doit tenir compte de l'état d'hydratation du matériau.

Ceci suppose que l'on connaisse les courbes de retrait-gonflement au niveau de l'ensemble de la couche et au niveau textural. La première de celle-ci est fréquemment

inaccessible, même empiriquement ; c'est le cas des couches travaillées notamment. Le problème n'est donc soluble que si l'on peut admettre une hypothèse simplificatrice dont la plus extrême est l'invariance du volume apparent, fréquemment acceptable pour les couches profondes.

Au niveau textural en revanche, des mesures pratiquées sur des agglomérats prélevés à des humidités différentes permettent d'obtenir des relations statistiques volume massique-humidité, suffisamment précises pour les besoins de l'analyse.

C'est le cas pour la couche subsuperficielle (8-15 cm) des parcelles non travaillées de l'essai (fig. 5). Les densités d'agglomérats ayant été mesurées à l'humidité w_a du prélèvement ($\bar{\gamma}^{\tau}_{d}$) et à l'état sec ($\bar{\gamma}^{\tau}_{dd}$), nous avons calculé l'accroissement du volume massique textural ΔV^t_m entre ces deux humidités par la relation :

$$\Delta V^t_m = \frac{1}{\rho_w}\left(\frac{1}{\bar{\gamma}^{\tau}_{d}} - \frac{1}{\bar{\gamma}^{\tau}_{dd}}\right).$$

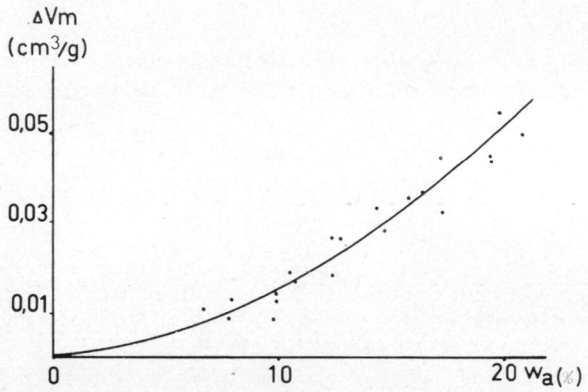


FIG. 5. — *Accroissement du volume de petits agglomérats naturels en fonction de leur humidité* (w_a).
Variation of unit volume dry mass of natural aggregates with their water content (w_a p. 100 *dry mass*).

Nous avons obtenu, à partir des résultats de trois années de mesure, l'ajustement suivant :

$$\Delta V^t_m = 0{,}0000793\ w_a^2 + 0{,}000869\ w_a \qquad r = 0{,}95 \qquad n = 22 \qquad (1)$$

pour $w_a < 22$ p. 100.

La liaison porosité texturale-teneur en eau est très étroite bien que les échantillons aient été prélevés après des histoires hydriques variables, suivant les années et les traitements (sec ou irrigué). On peut donc négliger les phénomènes d'hystérésis et considérer que cette relation est unique pour les matériaux considérés.

Un résultat similaire, obtenu sur un sol de nature très différente (Stengel et Faure, 1977) indique que cette hypothèse peut vraisemblablement être retenue pour une large gamme de matériaux naturels. Yong et Warkentin (1975) la considèrent comme vérifiée dans les couches de surface des sols agricoles.

V. — Influence de la constitution sur la porosité texturale à l'état sec

Nous avons pu montrer la constance de la porosité mesurée sur petits agglomérats à l'état sec et en inférer son origine texturale. Il reste à vérifier qu'elle est effectivement, dans les conditions naturelles, en relation étroite avec la constitution du matériau, et examiner la nature de cette relation.

5.1. — *Origine des variations de constitution des échantillons*

Il existe dans l'essai deux sources de variation de la constitution :

— L'une est préalable à l'implantation de l'essai : c'est l'hétérogénéité sur les 8 ha du dispositif de la constitution minérale du matériau. Les extrêmes de teneur en argile A décelés sont de 18,0 p. 100 et 29,4 p. 100. Cette variation intervient ici de façon complémentaire à celle de la teneur en limon 20-50 μ (L). On a en effet :

$$L = -0{,}804\ A + 56{,}3 \qquad r = 0{,}88 \qquad n = 44.$$

— L'autre est une conséquence des traitements eux-mêmes : elle résulte de la différence des profondeurs d'enfouissement, ou de l'absence d'enfouissement (traitement L_2) des résidus de récolte.

Il en découle (Monnier *et al.*, 1976) des variations importantes des teneurs en carbone organique, appartenant surtout à la fraction libre, dans les couches superficielles (tabl. 6).

TABLEAU 6

Teneurs moyennes en Carbone libre et lié (p. 1 000) *et intervalle de variation suivant les différentes techniques culturales*

Average free (*a*) *and bound* (*b*) *organic matter content* (C p. 1 000)

Traitement		L_0 Labour (Plowing)	L_1 Travail superficiel (Rotary cultivation)	L_2 Semis direct (Direct drilling)
0-7 cm	C libre (*a*)	1,4 ± 0,1	2,1 ± 0,2	2,3 ± 0,2
	C lié (*b*)	8,2 ± 0,5	9,8 ± 0,9	9,7 ± 0,7
0-15 cm	C libre (*a*)	1,4 ± 0,2	1,5 ± 0,1	1,3 ± 0,2
	C lié (*b*)	8,4 ± 0,4	9,2 ± 0,8	8,8 ± 0,4

5.2. — *Choix des variables*

En ce qui concerne la constitution minérale, nous n'avons retenu comme variable explicative de la porosité texturale que la teneur en argile. Son rôle déterminant dans

l'organisation texturale ne peut cependant pas être dissocié de celui du squelette pour des teneurs telles que celles que nous avons rencontrées (Fiès, 1971, 1978).

Cette attitude revient à admettre que les caractéristiques propres à chacune des fractions, argile et squelette, ne varient pas avec leurs proportions respectives et à négliger en particulier les variations de la granulométrie du squelette mises en évidence par la liaison entre L et A (§ V.1).

Elle est justifiée par le fait que les références expérimentales disponibles (Fiès, 1971) portent exclusivement sur des mélanges binaires argile-squelette et que l'effet propre des caractéristiques du squelette reste ininterprété.

Pour ce qui est des constituants organiques, nous n'avons considéré que la teneur en carbone libre C_1 (Monnier *et al.*, 1962), l'amplitude des variations de la teneur en carbone lié étant faible. La richesse relative en carbone lié d'un échantillon vis-à-vis des modifications de son comportement physique, doit en effet s'exprimer par le rapport $\frac{C\ lié}{A}$ (Monnier, 1965) et, pour nos échantillons, ce rapport varie essentiellement en fonction de A ($r = -0{,}80$).

5.3. — *Résultats*

La densité d'agglomérats secs $\bar{\gamma}^{\tau}_{dd}$ est liée à A (p. 100) et C_1 (p. 100) par la relation :

$$\bar{\gamma}^{\tau}_{dd} = 0{,}00755\ A - 0{,}0414\ C_1 + 1{,}727 \qquad r = 0{,}75 \qquad n = 42$$

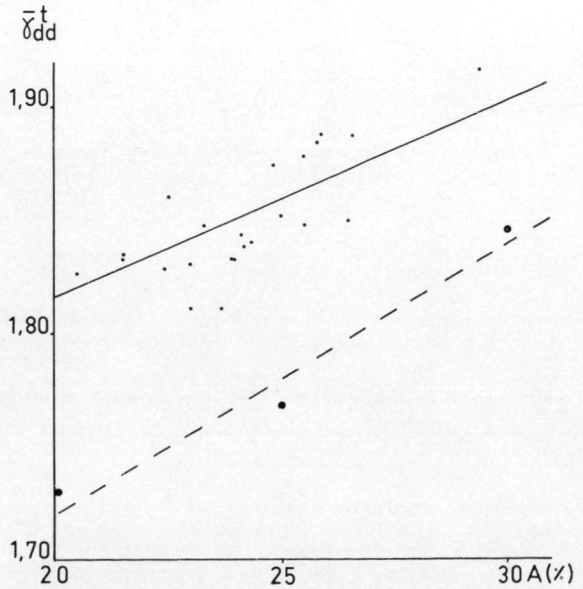


FIG. 6. — *Variation de la densité texturale à l'état sec* ($\bar{\gamma}^{\tau}_{dd}$) *avec la teneur en argile* (A).
Variation of dry textural density ($\bar{\gamma}^{\tau}_{dd}$) *with clay content* (A p. 100).

- Echantillons naturels prélevés à 7-15 cm
  $\bar{\gamma}^{\tau}_{dd} = 0{,}008\ 8\ A + 1{,}64 \qquad r = 0{,}73$
- Echantillons artificiels : mélange d'argile du sol et de limon 2-50 μ (Fiès, 1971).

(la fraction de variance expliquée par chacune des deux variables diffère de 0 de façon hautement significative). L'écart-type résiduel est de 0,025, ce qui équivaut approximativement à 1 p. 100 de porosité.

Nous constatons, par ailleurs, que le sens de variation de $\bar{\gamma}_{dd}^{\tau}$ en fonction de A et l'ordre de grandeur de la pente sont compatibles avec les résultats obtenus par Fiès sur des mélanges de limon 2-50 μ (qui constitue l'essentiel du squelette de nos échantillons) et d'une argile de sol de nature voisine de celle de nos essais (fig. 6). La valeur prévisionnelle des résultats obtenus par cet auteur sur échantillons modèles est ainsi démontrée.

Quant à l'effet de la matière organique libre, nous avons d'abord vérifié qu'il ne pouvait résulter de la seule variation de la densité de solide du matériau $\bar{\gamma}_s$ (fig. 7). Les variations mesurées de $\bar{\gamma}_s$ en fonction de la teneur en carbone total (C_T) conduisent à une évaluation de la densité de solide de la matière organique de 1,43 en supposant sa teneur en carbone égale à 50 p. 100. Cette valeur est également admissible pour la fraction libre (Monnier, communication personnelle). $\bar{\gamma}_s$ varie alors en fonction de C_T ou de C_1 suivant une hyperbole très tendue dans l'intervalle considéré, peu différente d'une droite de pente moyenne : — 0,004 8, très petite par rapport au coefficient de régression partielle en C_1. La présence de matière organique libre induit donc bien une porosité texturale supplémentaire.

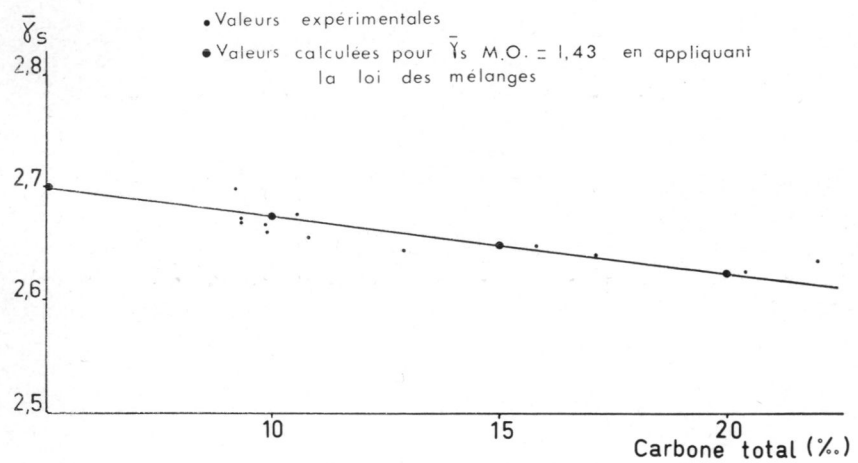


FIG. 7. — *Variation de la densité de solide* ($\bar{\gamma}_s$) *avec la teneur en carbone total.*
Variation of particle density ($\bar{\gamma}_s$) *with total organic matter content* (C p. 1 000).

En effet, si n'^{τ}_{d} restait constante, on aurait :

$$\bar{\gamma}_{dd}^{\tau} = \left(\frac{100 - n'^{\tau}_{d}}{100}\right) \bar{\gamma}_s = \left(\frac{100 - n'^{\tau}_{d}}{100}\right) (-0{,}004\,8\ C_1) + \text{Cte}$$

avec $\dfrac{100 - n'^{\tau}_{d}}{100} < 1.$

Cet accroissement de porosité résulte de la combinaison de deux effets (Guérif, 1976) :

— l'un purement stérique : l'arrangement des débris organiques et des éléments minéraux ménage un volume de lacunes supérieur à celui des éléments minéraux seuls ;

— l'autre mécanique : la présence de débris organiques à comportement élastique rend le matériau moins sensible au tassement.

5.4. — *Comparaison avec des échantillons remaniés*

La relation $\bar{\gamma}^{\tau}_{dd}$, A, C_1, ayant été obtenue à partir d'échantillons naturels, doit être considérée comme relative à un « niveau de contraintes » moyen caractéristique de l'essai, résultant du climat local (contraintes apparaissant lors du retrait et du gonflement) ainsi que des différentes techniques culturales et matériels utilisés. Afin d'en vérifier la généralité, il est nécessaire d'établir son existence pour des échantillons de même nature soumis à une histoire hydrique et mécanique standard.

Comportant un malaxage, la technique utilisée pour préparer ces échantillons provoque une redistribution des débris organiques et peut, par conséquent, modifier les effets stériques mentionnés plus haut. De telles modifications étant difficilement interprétables, nous nous sommes efforcés de ne prendre en compte que l'effet de l'argile. Pour cela nous n'avons retenu que les échantillons extraits de la couche 7-15 cm où les teneurs en carbone libre sont plus faibles et moins variables.

On a pour les agglomérats naturels extraits de cette couche où l'effet de C_1 n'est pas significatif :

$$\bar{\gamma}^{\tau}_{dd} = 0{,}008\,81\ A + 1{,}64 \qquad r = 0{,}73 \qquad n = 34. \tag{2}$$

Et nous avons obtenu pour les échantillons remaniés :

$$\bar{\gamma}^{t}_{dd} = 0{,}014\,5\ A + 1{,}455 \qquad r = 0{,}76 \qquad n = 21. \tag{3}$$

Dans le but d'isoler l'effet propre de la fraction argileuse, nous avons séparé l'argile et le squelette d'un échantillon du sol de l'essai, après destruction de la matière organique, et constitué, en utilisant la même technique de préparation, des échantillons à 20 p. 100 ,25 p. 100 et 30 p. 100 d'argile.

On constate (fig. 8) que la variation de densité en fonction de A dans cet intervalle est approximativement linéaire, la pente moyenne (0,018 6) étant non significativement différente du coefficient de la régression (3). On est donc fondé à admettre que celui-ci traduit bien une relation causale et mesure l'effet propre de la teneur en argile sur $\bar{\gamma}^{t}_{dd}$, pour une « histoire » de l'échantillon correspondant à la technique de préparation choisie.

Quant aux échantillons naturels (régression 2), leur densité est en moyenne plus élevée que celle des échantillons reconstitués et liée à A par un coefficient de régression plus faible.

On peut interpréter ce résultat en supposant que les contraintes qu'ils ont subies *in situ* ont provoqué un tassement d'autant plus intense que leur teneur en argile est plus faible. Cette hypothèse est d'ailleurs conforme aux résultats de Faure et Fiès (1972) comparant les densités d'échantillons préparés par la technique utilisée ici et celles des mêmes matériaux après compactage Proctor.

L'ensemble de ces résultats illustre clairement l'intérêt de la notion de porosité texturale pour l'analyse de l'état physique d'un sol à partir de sa constitution, et

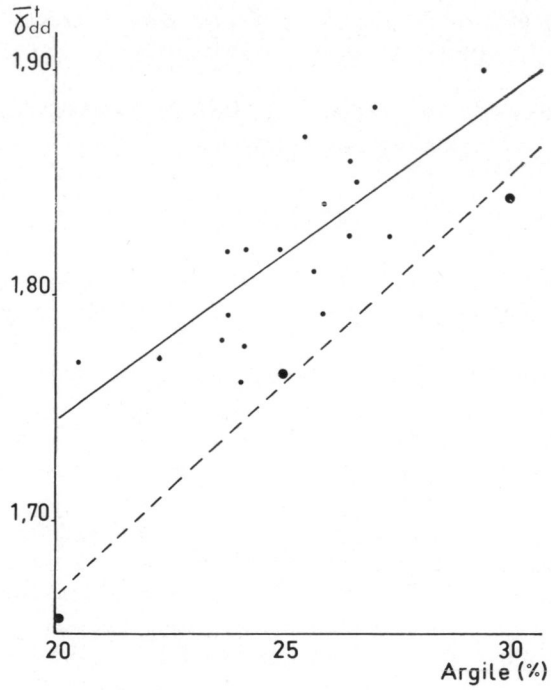


FIG. 8. — *Variation de la densité texturale mesurée sur échantillons remaniés* ($\overline{\gamma}^{\tau}_{dd}$) *avec la teneur en argile.*
Changes of dry textural density ($\overline{\gamma}^{\tau}_{dd}$) *of remoulded samples with clay content* (A p. 100).

- Sols de l'essai remanié $\overline{\gamma}^{\tau}_{dd} = 0{,}014\,5\,A + 1{,}46 \qquad r = 0{,}76.$
- Echantillons reconstitués à partir des fractions argile et squelette, dépourvus de matière organique.

démontre la possibilité d'évaluer cette porosité texturale par une mesure portant sur de petits agglomérats.

Il fait ressortir également l'utilité de méthodes d'obtention d'échantillons d'histoire hydrique et mécanique convenablement standardisée pour la généralisation des résultats obtenus à des conditions de milieu (climatiques ou culturales) différentes.

VI. — Variations de la porosité structurale en sol non travaillé

6.1. — *Méthode de calcul*

Nous avons utilisé ici les valeurs de porosité totale obtenue au cours de quatre campagnes annuelles de mesures (1973 à 1976), à la profondeur de 8-15 cm, dans des parcelles en semis direct, portant une culture de blé ou de maïs, irriguée ou non (nous nous sommes assurés qu'aucun de ces facteurs : année, culture ou irrigation, n'avait d'effet significatif).

Ne disposant pas de mesures de densité texturale à l'état humide pour chaque prélèvement densitométrique, nous l'avons calculée à partir de la régression (1)

(§ IV.2) et des résultats complets de mesures réalisées sur agglomérats secs. A cet égard, il existe une indétermination de l'humidité à retenir dans le calcul pour les agglomérats. En effet, leur humidité propre diffère souvent de façon sensible de celle de l'ensemble de la couche de sol dont ils sont extraits.

Cet écart est particulièrement net pour les humidités élevées (fig. 9) où la teneur en eau du prélèvement densitométrique (w_D) est systématiquement supérieure à celle des agglomérats (w_a).

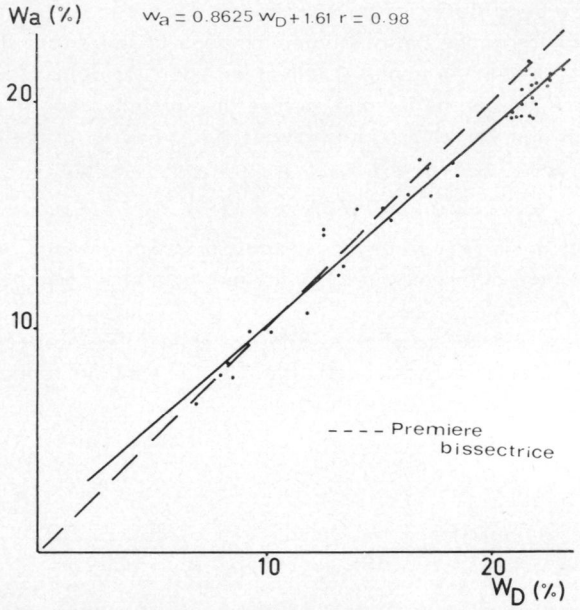


FIG. 9. — *Relation entre la teneur en eau* (w_a) *de petits agglomérats et celle du prélèvement densitométrique* (w_D).

Correlation between water content of natural aggregates (w_a p. 100) *and water content of the layer bulk* (w_D p. 100).

Celles-ci correspondent à des mesures pratiquées quelques jours après un épisode pluvieux dans une période générale de réhumectation. La différence s'explique alors par la présence d'eau dans les pores grossiers, extérieurs aux agglomérats.

Ce fait complique l'interprétation d'analyses de porosité pratiquées à des humidités différentes quand de telles variations ne sont pas négligeables. Il fixe une limite à la précision à espérer d'un modèle prévisionnel de la porosité structurale à toute époque, en tenant compte exclusivement de l'humidité de l'ensemble du matériau, telle qu'elle est obtenue par les moyens habituels : sonde neutronique ou prélèvement à la tarière.

Dans le cas présent, nous avons calculé l'humidité des agglomérats (w_a p. 100) à partir de la régression établie pour les situations où nous disposions des deux mesures :

$$w_a = 0{,}862\,5\ w_D + 1{,}61 \qquad r = 0{,}98 \qquad n = 44.$$

w_D = teneur en eau du prélèvement densitométrique p. 100.

6.2. — *Résultats*

Les mécanismes de formation d'une porosité structurale dans un sol cultivé et non travaillé nous paraissant *a priori* différer peu de ceux qui agissent sous une prairie de graminées, nous avons supposé, d'après les résultats de Tri (1968-1973) qu'ils étaient essentiellement sous la dépendance de la capacité de gonflement du matériau. Tri évaluait cette capacité de gonflement par une mesure du « gonflement potentiel », c'est-à-dire de la variation de volume d'un échantillon remanié entre l'état sec et l'équilibre avec de l'eau libre.

Dans le cas de la couche de sol étudiée ici, deux facteurs sont susceptibles d'agir sur le gonflement : teneur en argile et teneur en eau ; les autres facteurs possibles : nature et garniture ionique de l'argile, nature du squelette, teneur en matière organique sont en effet peu variables. Nous avons donc mis la porosité structurale en relation avec ces deux facteurs et nous avons obtenu l'ajustement :

$$n^s = -0{,}223\ w_D + 0{,}287\ A + 7{,}39 \qquad r = 0{,}50 \qquad n = 88. \tag{4}$$

L'effet négatif de la teneur en eau traduit nécessairement l'existence de deux courbes de gonflement différentes, à l'échelle texturale et à l'échelle de la couche de sol.

A cette dernière échelle en effet, et à la dispersion des mesures près, la courbe de gonflement paraît être une horizontale (fig. 10). On est donc fondé à considérer que la porosité totale est invariante avec l'humidité.

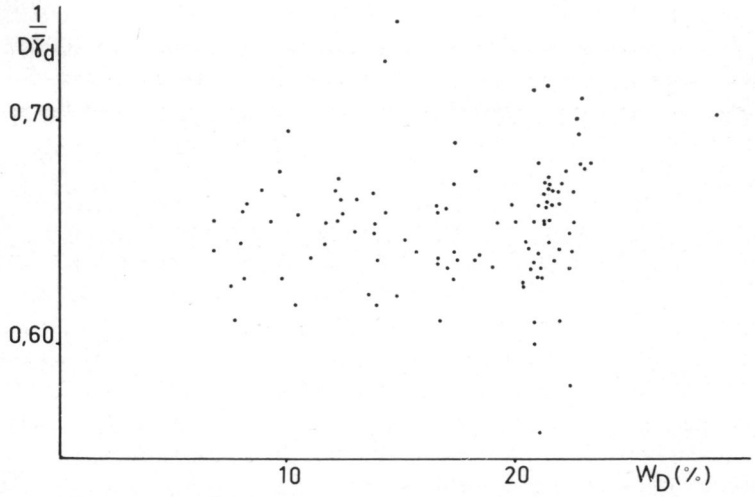


FIG. 10. — *Variation de* $\frac{1}{D\bar{\gamma}_d}$ *avec la teneur en eau (profondeur 8-15 cm, sol non travaillé).*

Variation of $\frac{1}{D\bar{\gamma}_d}$ *with water content* (w_D p. 100) ; *direct drilling,* $\frac{1}{D\bar{\gamma}_d}$: *dry bulk density.*

Ce fait nous autorise :

— à regrouper les valeurs de $D\bar{\gamma}_d$ obtenues sur une même parcelle quelle que soit leur humidité et à ne considérer que leur moyenne,

— à introduire dans la régression les valeurs de la porosité structurale « potentielle » calculée à partir des densités d'agglomérats secs.

Nous avons donc répété le calcul de la régression suivant ces modalités. On aboutit à l'équation :

$$n^s = -0{,}319\ w_D + 0{,}438\ A + 4{,}83 \qquad r = 0{,}94 \qquad n = 34. \qquad (5)$$

La meilleure précision de cet ajustement permet de comparer la valeur du coefficient de régression partielle en w_D à celui qui résulte du calcul à partir de l'équation :

$$n^s = 100 \left(1 - {}^{D}\bar{\gamma}_d \times \frac{1}{\bar{\gamma}^{\tau}_d}\right)$$

et des régressions $\frac{1}{\bar{\gamma}^{\tau}_d}$, w_a (§ IV.2) et w_a, w_D (3 § VI.1).

La valeur obtenue (— 0,341) est très peu différente de — 0,319. Ce coefficient de régression partielle traduit donc essentiellement l'effet du gonflement au niveau textural et exprime le caractère complémentaire des variations respectives des porosités texturale et structurale avec l'humidité.

On peut se livrer au même calcul pour le coefficient de régression partielle en A en utilisant la régression $\bar{\gamma}^{\tau}_d$, A ((2) § V.4). Le résultat (+ 0,397) est également très voisin de celui de l'ajustement (5).

Ces deux coefficients peuvent donc être interprétés en ne considérant que le déterminisme de la porosité texturale. C'est essentiellement par l'étude du retrait et du gonflement à cette échelle qu'on peut espérer découvrir les lois sous-jacentes à une relation statistique de ce type.

Le déterminisme propre de la porosité structurale devrait quant à lui expliquer la valeur du terme constant de l'ajustement (5). On peut par exemple considérer que la capacité au champ w_{cc} correspond dans ce sol bien drainé au gonflement textural maximum du matériau en place. La porosité structurale à cette humidité est alors la part de porosité structurale non liée de façon réversible à l'état de gonflement textural. Et l'ajustement (5) se réécrit :

$$n^s = 0{,}438\ A + 0{,}319(w_{cc} - w_D) - 0{,}319\ w_{cc} + 4{,}83.$$

La valeur de w_{cc} peut être estimée par l'équation de Gras (1957) bien adaptée aux matériaux ayant cette texture :

$$w_{cc} = 0{,}59\ A + 0{,}16\ l + 5{,}47$$

l = teneur en limon 2-20 μ (en moyenne 30,1 p. 100 pour nos échantillons).

On aboutit à :

$$n^s = 0{,}25\ A + 0{,}32(w_{cc} - w_D) + 1{,}5.$$

On voit qu'à la capacité au champ, n^s est lié positivement à la teneur en argile, donc au « gonflement potentiel », ce qui est en accord avec les conclusions de Tri. Il resterait cependant à distinguer dans cette porosité structurale la part des fissures restant ouvertes à la capacité au champ et celle des pores d'origine biologique.

Outre cette tentative d'interprétation de l'état structural moyen dans cette couche non travaillée, le déterminisme propre de la porosité structurale est à rechercher dans l'interprétation de la variance résiduelle de l'ajustement (4), qui représente 75 p. 100 de la variance totale de la porosité structurale. La dispersion de n^s, même dans ces conditions d'échantillonnage où plusieurs facteurs de variation ont été éliminés (travail du sol, roulage, proximité de la plante) reste considérable (fig. 11). L'effet des

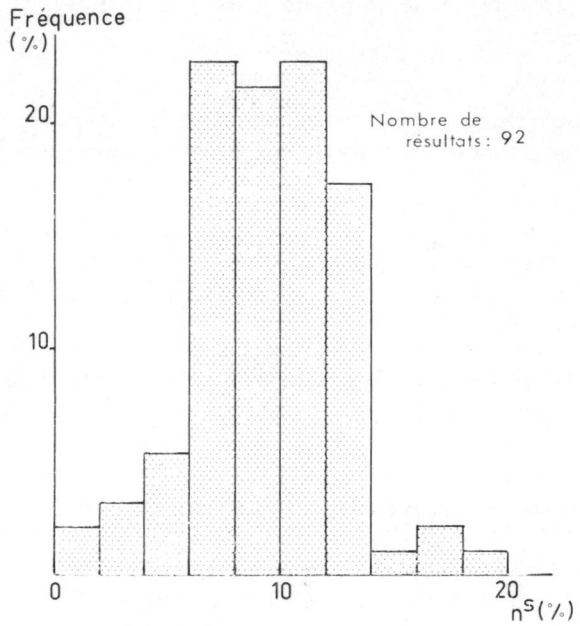


FIG. 11. — *Distribution de la porosité structurale* n^s (8-15 cm, *sol non travaillé*).
Distribution of structural porosity (n^s p. 100) ; *direct-drilling*.

variations de la porosité texturale en étant également éliminé, son étude doit être abordée en deux étapes :

— l'interprétation de la courbe de distribution de n^s en termes morphologiques, permettant de quantifier les paramètres géométriques descriptifs des systèmes de porosité d'origine différente (biologique, histoire hydrique), constitutifs de n^s,

— l'étude du déterminisme de ces paramètres morphologiques, essentiellement au niveau des interactions constitution de matériau-histoire hydrique (éventuellement modifiées par la présence de racines), l'étude des systèmes biologiques relevant de l'écologie de la faune du sol.

VII. — Conclusion

Les résultats présentés ont démontré, pour des matériaux naturels de texture limono-argileuse, la possibilité de mesurer sur des agglomérats de petites tailles, une porosité dont l'origine est essentiellement texturale.

L'intérêt d'isoler ce système de porosité est apparu simultanément par la possibilité d'établir des relations constitution-teneur en eau-porosité texturale, et d'évaluer dans les variations de porosité structurale la part qui leur est due ; ceci constitue un progrès important dans l'étude du déterminisme de l'état physique du sol. Ainsi, une de ces relations a mis en évidence l'effet extrêmement intense des matières organiques libres sur la porosité texturale et la nécessité de prendre en compte cette variable pour prévoir l'état et ultérieurement le comportement des sols en place.

Toutefois, pour la généralisation de ces relations de nature statistique, et *a fortiori* l'étude des mécanismes qui les sous-tendent, l'utilisation d'échantillons préparés dans des conditions standards qui permettent d'éliminer l'influence possible de facteurs non contrôlés *in situ* reste, nous l'avons vu, nécessaire.

Quant au déterminisme propre à la porosité structurale, nous rencontrons les difficultés liées à sa définition : elle n'est en effet définie que par différence entre la porosité totale et la porosité texturale et ses origines sont complexes. En sol non travaillé, elle résulte de facteurs biologiques et des phénomènes de retrait et gonflement. La condition préalable de son évaluation correcte, c'est-à-dire de l'amélioration des mesures de porosité totale, étant supposée satisfaite, il sera évidemment nécessaire d'établir une distinction entre des systèmes de porosité dont l'origine est aussi différente, un critère possible étant leur morphologie. C'est seulement après cette amélioration de l'analyse que des modèles prévisionnels de la porosité structurale résultant du retrait et du gonflement, obtenus par voie expérimentale, pourront être confrontés à des résultats acquis *in situ*.

Reçu pour publication en mars 1979.

Summary

Evaluation of textural and structural porosities : interest for the characterization of the physical state of soils

Soil porosity can be distinguished into two forms, related to sets of pores of different origins. We have thus textural porosity, resulting from the arrangement of elementary particles, and structural porosity.

The interest of this analysis has been estimated from measurements taken in a field experiment about reduced tillage.

This critical study brings out the built-in limitations of the classical techniques for the measurement of total porosity on the basis of an external volume evaluation.

With the clay-silt soil of the experiment, the porosity measured on small aggregates is shown to be :

— nearly constant in time (in the dry state) and closely bound to the free carbon and clay contents of the material,

— bound to the soil-water content by an univocal relationship.

Those observations give strength to the hypothesis on account of which this porosity is dependant mainly upon the soil physical make-up and may be seen as having a textural origin. Also, these observations underline the worth of the distinction between the two forms of porosity for purposes of soil physical state characterization, and this not with standing the lack of precision of the textural porosity concept.

Thus, in a study of the variations of structural porosity under conditions of zero tillage, we have been able to evalute the respective parts of :

— textural swelling, with the resultant lowering of structural porosity in a given structure,

— differences in structure.

On this last account, it still remains to distinguish the effects of biological activity from those of soil-water content variations.

Zusammenfassung

Anwendung der Analyse der Porositätssystemen fur das Bestimmen des physischen Zustandes des Bodens in situ

Die Bedeutung der Unterscheidung zwischen Gefüge- und Strukturporosität für das Bestimmen des physischen Zustandes eines Bodens ist aufgrund der in einer Prüfung zur Vereinfachung der Bodenarbeit erzielten Ergebnisse besprochen.

Diese Kritik betont die für die klassischen Messungstechniken der Gesamtporosität charakteristischen Grenzen, die sich auf die Messung des sichtbaren Volumens stützen.

In dem lehmtonigen Boden des Versuches hängt die auf kleinen, natürlichen Agglomeraten gemessene Porosität hauptsächlich von der mineralischen und organischen Beschaffenheit des Materials und von seinem Wassergehalt ab. Sie kann deswegen mit der Gefügeporosität gleichgestellt werden.

Die Schätzung der Strukturporosität erscheint als ein besseres Mittel zum Vergleich der verschiedenen Strukturzustände als die einfache Messung der Gesamtporosität, wenn der Wassergehalt und oder die Bodenbeschaffenheit veränderlich sind. Um den Determinismus der Strukturporosität im nicht bebauten Boden zu untersuchen, müssen die Wirkungen der biologischen Tätigkeit von diesen der Wassergeschichte unterscheidet werden.

РЕЗЮМЕ

Прпименение анализа систем порозности для охарактеризования физического состояния почвы in situ.

Стенжель П.

Интерес различия между порозностью текстуры и порозностью структуры для охарактеризования физического состояния почвы, обсуждается на базе результатов, полученных в опыте упрощения почвенной обработки.

Критика эта подчеркивает границы классической технологии измерения общей порозности, основанной на изшерениях видимого об'ема.

В глинисто-суглинистой почве опыта, порозность, измеренная на небольших природных агломератах, зависит главным образом от минерального и органического состава материала, и от содержания в нем воды. Порозность зту можно значит приравнять с порозностью текстуры.

В случаях существования различий в содержании воды в почве и (или) в составе этой почвы, оценка порозности структуры представляет, кажется, лучший способ сравнения между разными состояниями структуры, чем простое измерение общей порозности. Для рассмотрения детерминизма порозности структуры в необработанной почве необходимо проводить различие между эффектами биологической активности и эффектами водного прошлого.

Références bibliographiques

BODET J. M., NOLOT J. M., PERROY J., FOURBET J. F., 1976. Présentation des essais. C. R. du Colloque : *Simplification du travail du sol en rotation céréalière*. I.T.C.F., 22-71.

BOUMA J., ANDERSON J. L., 1977. Water and chloride movement through soil columns simulating pedal soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **41** (4), 766-770.

CHILDS E. C., 1969. *An introduction to the physical basis of soil water phenomena*. John Wiley and sons, 92-96.

FAURE A., FIÈS J. C., 1972. Etude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. agron.* **23** (3), 317-332.

FIÈS J. C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.* **22** (6), 655-685.

FIÈS J. C., HÉNIN S., MONNIER G., 1972. Etude de quelques lois régissant la porosité de matériaux meubles. *Ann. agron.* **23** (6), 621-655.

GRAS R., 1957. Cité par HÉNIN *et al.*, *Le profil cultural*, 1969, p. 25.

GUÉRIF J., 1976. *Première contribution à l'étude de l'influence des matières organiques sur le comportement au compactage des sols*. Mémoire de D.E.A., U.S.T.L.-E.N.S.A. Montpellier.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.* **19** (2), 129-152.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.* **13** (1), 55-63.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols*. Thèse Paris.

MONNIER G., STENGEL P., FIÈS J. C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.* **24** (5), 533-545.

MONNIER G., STENGEL P., BODET J. M., 1976. Conséquences de la répartition des matières organiques sur le comportement du sol. C. R. du Colloque : *Simplification du travail du sol en rotation céréalière*. I.T.C.F., 150-165.

STENGEL P., 1976. Incidence de la simplification du travail du sol sur la porosité de la couche arable. C. R du Colloque : *Simplification du travail du sol en rotation céréalière*. I.T.C.F., 132-149.

STENGEL P., FAURE A., 1978. Comportement mécanique d'un sol argileux soumis au roulage d'engins agricoles. *C. R. Acad. Agric. Fr.* **64,** 119-124.

THOMASSON A. J., 1978 Towards on objective classification of soil structure. *J. Soil Sci.* **29** (1), 38-46.

TRI B. H., 1968. Dynamique de la granulation des sols sous prairie. *Ann. agron.* **19** (4), 415-539.

TRI B. H., MONNIER G., 1973. Etude quantitative de la granulation des sols sous prairie de graminées. *Ann. agron.* **24** (6), 651-677.

YONG R. N., WARKENTIN B. N., 1975. *Soil properties and behaviour*. Elsevier, p. 196.

Annexe I. — Définition des grandeurs mesurées et calculées

I. — *Grandeurs mesurées : Densités*

1. *Définition.*

$\bar{\gamma}_d$ est la densité sèche de l'échantillon, sans dimension :

$$\bar{\gamma}_d = \frac{\rho_d}{\rho_w}$$

ρ_d étant la masse volumique sèche de l'échantillon, rapport entre sa masse à l'état sec et son volume à l'état humide.

ρ_w la masse volumique de l'eau à 4 °C considérée comme égale à 1 g $\times$ cm^{-3}.

$\bar{\gamma}_s$ est la densité de solide du matériau :

$$\bar{\gamma}_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

ρ_s étant la masse volumique du solide constituant l'échantillon.

2. *Symboles utilisés.*

	Nature de l'échantillon		
	Couche de sol en place	Agglomérats naturels	Eprouvette remaniée
Humide	$^{D}\bar{\gamma}_d$	$\bar{\gamma}_d^{\tau}$	$\bar{\gamma}_d^{t}$
Séché étuve à 105 °C	—	$\bar{\gamma}_{dd}^{\tau}$	$\bar{\gamma}_{dd}^{t}$
Technique de mesure	Densitomètre à membrane	Poussée hydrostatique dans le pétrole	

II. — *Grandeurs calculées*

1. *Porosités.*

n Rapport entre le volume des pores et le volume apparent de l'échantillon considéré, exprimé en p. 100.

a) Par rapport au volume d'une couche de sol en place :

n^T porosité totale

$$n^T = 100 \left(1 - \frac{^{D}\bar{\gamma}_d}{\bar{\gamma}_s}\right)$$

n^τ porosité texturale

$$n^\tau = 100\ ^{D}\bar{\gamma}_d \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_d^{\tau}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_s}\right)$$

n^s porosité structurale

$$n^s = n^T - n^\tau = 100 \left(1 - \frac{{}^D\bar{\gamma}_d}{\bar{\gamma}_d}\right)$$

n_d^τ porosité texturale à l'état sec

$$n_d^\tau = 100\ {}^D\bar{\gamma}_d \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{dd}^\tau} - \frac{1}{\bar{\gamma}_s}\right).$$

b) Par rapport au volume d'agglomérats :

n'^τ_d porosité texturale à l'état sec

$$n'^\tau_d = 100 \left(1 - \frac{\bar{\gamma}_{dd}^\tau}{\bar{\gamma}_s}\right).$$

2. *Volume massique.*

$\frac{1}{\rho_d}$ étant l'inverse de la masse volumique en $cm^3 \times g^{-1}$, on utilise dans le texte :

$\frac{1}{\bar{\gamma}_d}$ sans dimension, qui a même valeur numérique.

d'où :

$\frac{1}{{}^D\bar{\gamma}_d}$ pour une couche de sol en place,

$\frac{1}{\bar{\gamma}_d^\tau}$ pour des agglomérats humides,

$\frac{1}{\bar{\gamma}_{dd}^\tau}$ pour des agglomérats secs.

Ann. agron., 1979, **30** (1), 53-62.

Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échange et de précipitation dans les systèmes sol-eau-électrolyte

J. E. DUFEY, C. M. PETIT, Y. GOBLET, H. LAUDELOUT

avec la collaboration technique de J. SNAUWAERT et M. MAINIL

Université de Louvain, Département Science du Sol,
Place Croix-du-Sud, 2
B-1348 Louvain la Neuve (Belgique)

Résumé

Cette note présente une méthode numérique permettant de calculer la composition d'équilibre d'un système sol-eau-électrolyte. Les réactions prises en considération par le programme sont d'une part, les échanges entre calcium, magnésium et sodium, et d'autre part, les précipitations et dissolutions de gypse et de calcite. Quelques expériences en laboratoire ont permis de vérifier le bien-fondé de la méthode proposée.

Le programme FORTRAN a été conçu de façon à ce qu'il puisse être greffé aisément sur un modèle général décrivant le mouvement des sels dans les sols irrigués, notamment en régions arides et semi-arides.

En outre, ce programme permet d'obtenir, à partir des analyses classiques de laboratoire, une image plus exacte du milieu ionique du sol aux teneurs en eau effectivement observées dans la nature. Un certain nombre d'analyses habituellement pratiquées peuvent également être avantageusement remplacées par le calcul.

Introduction

L'intensification de l'agriculture dans les régions arides implique toujours le recours à l'irrigation. Le succès de cette techhique, si elle est conduite pendant de nombreuses années, dépendra essentiellement de la façon dont on aura tenu compte de ses conséquences sur la qualité des terres. Les sols irrigués acquièrent des caractéristiques nouvelles qui dépendent notamment de la quantité et de la composition de l'eau apportée.

Dans de nombreuses régions, la pratique de l'irrigation a entraîné une salure excessive des sols, souvent couplée à une sodification du complexe d'échange. On comprend dès lors qu'il soit indispensable d'estimer les effets possibles de l'irrigation sur la composition et les propriétés des sols, de façon à prendre en temps opportun les décisions appropriées.

Etant donné la diversité des situations et la rapidité des réponses souhaitées, seuls les modèles de simulation sur ordinateur peuvent prétendre fournir ces prévisions à un coût minimal. L'élaboration de tels modèles a fait l'objet de recherches très actives au cours des dernières années. On lira à cet égard l'intéressante synthèse bibliographique publiée récemment par Rieu et Cheverry (1976).

La description mathématique du transfert d'une espèce chimique dans le sol comporte presque toujours deux aspects : d'une part, le mouvement de cette espèce avec la solution du sol par convection, et à travers cette solution par diffusion, et d'autre part, les réactions qu'elle peut subir suite aux modifications de son environnement physico-chimique. Ces deux aspects sont généralement traités séparément lors de l'élaboration d'un modèle de simulation. Un sous-programme décrit les variations de concentration des solutés dans la solution du sol sous l'effet du transport convectif et diffusif. Un autre sous-programme procède aux rééquilibrages indispensables entre la solution du sol et les autres phases (précipités, complexe d'échange). On appelle ces deux sous-programmes alternativement de façon à simuler la simultanéité de ces processus.

Une description correcte du mouvement de la solution du sol, incluant notamment les phénomènes de dispersion hydrodynamique, est évidemment indispensable. La pratique toutefois nous a appris que des modèles de mouvement relativement simples peuvent donner des résultats très satisfaisants sur le terrain. C'est pourquoi, nous estimons que les efforts d'affinement des modèles doivent surtout porter sur le développement de sous-programmes décrivant les réactions des solutés au cours de leur entraînement. Ce sont ces réactions qui dominent la détermination de la distribution des ions dans le profil bien plus que les phénomènes de dispersion.

L'objet de cette note est de présenter un programme de ce type dont le développement a été prévu de façon à ce qu'il puisse être couplé à n'importe quel modèle de transport convectif. Ce programme devait donc répondre à une double exigence de coût minimal et de performance optimale. En effet, la simulation numérique du mouvement des sels nécessite le découpage des coordonnées d'espace et de temps en incréments finis. Or, à chaque nœud du réseau de mailles ainsi défini, il faut faire appel à un programme de rééquilibrage. Cela veut dire que celui-ci devra fonctionner plusieurs centaines de fois au cours d'une seule simulation de mouvement de sels. Il ne convient donc pas que son coût soit prohibitif. De plus, ses risques d'échec doivent être aussi minimes que possible, puisque cela entraînerait l'abandon de la simulation globale par l'ordinateur.

Outre son utilité potentielle en tant que composante indispensable d'un modèle du mouvement de sels, le programme présenté ci-après peut être utilisé indépendamment pour traiter les résultats des analyses classiques de sol effectuées en laboratoire, de façon à obtenir une image plus exacte du milieu ionique du sol aux teneurs en eau qui sont effectivement observées.

Nous décrirons tout d'abord assez brièvement ce programme, sans nous étendre sur les nombreuses techniques de calcul numérique auxquelles il fait appel. Une copie du programme FORTRAN et un exemple de sortie sont à la disposition des lecteurs.

Nous présenterons ensuite quelques résultats expérimentaux qui ont permis de valider notre modèle.

Description du programme

Le sol peut être considéré comme un système à quatre phases : une phase solide, une phase gazeuse, une phase liquide et une phase de surface échangeuse d'ions. Ce serait évidemment une gageure que d'envisager une description complète des rela-

tions d'équilibre et des réactions chimiques régissant la composition de chacune de ces phases. Toutefois, certains auteurs ont élaboré des programmes de simulation très complexes qui leur permettent de prendre en considération plusieurs centaines d'espèces chimiques. A titre d'exemples, on peut citer les publications récentes de Droubi, Fritz et Tardy (1976) et de Sposito et Mattigod (1977).

La complexité de programmes aussi complets ne s'accorde malheureusement pas avec les impératifs de coût et de performance que nous avons mentionnés dans l'introduction. C'est pourquoi notre première démarche a été de délimiter les espèces chimiques les plus susceptibles d'être impliquées dans le mouvement des sels, lors de l'irrigation en régions arides. Cette simplification volontaire sera acceptable dans la mesure où les erreurs sur les concentrations que le modèle permettra de calculer ne seront pas supérieures aux erreurs des mesures expérimentales. C'est ce qui sera vérifié dans la section suivante.

Notre programme de simulation prend en considération les espèces suivantes :

— dans la phase gazeuse : la pression partielle de CO_2 ;

— dans la phase liquide : les concentrations des cations Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, H_3O^{+} ; des anions Cl^{-}, SO_4^{--}, CO_3^{--}, HCO_3^{-}, OH^{-} ; des paires d'ions $CaSO_4^0$, $MgSO_4^0$, $CaCO_3^0$, $MgCO_3^0$, $H_2CO_3^0$;

— dans la phase solide : les quantités de gypse $CaSO_4$, 2 H_2O et de calcite $CaCO_3$;

— dans la phase de surface : les cations adsorbés Ca^{++}, Mg^{++} et Na^{+}.

La figure 1 présente un organigramme général du programme de calcul numérique. Un premier sous-modèle (EQUSOL) calcule les concentrations à l'équilibre dans une solution d'électrolyte en contact avec une phase gazeuse. Les données d'entrée sont les concentrations totales de calcium, de magnésium, de sodium, de chlorure et de sulfate. Il convient en outre de fixer soit le pH final de la solution, soit la pression partielle en CO_2 dans la phase gazeuse avec laquelle la solution est en équilibre.

Le calcul s'appuie sur huit constantes thermodynamiques d'équilibre entre les espèces chimiques, cinq équations de conservation et une équation d'électroneutralité [5]. Les activités des espèces neutres sont assimilées à leurs concentrations, tandis que les coefficients d'activité (γ) des espèces chargées sont calculés par une équation dérivée de la théorie de Debye-Hückel.

$$-\log \gamma = \frac{Az^2 \sqrt{I}}{1 + aB\sqrt{I}} - bI$$

z est la charge de l'ion, I est la force ionique de la solution, A et B sont des constantes caractéristiques du solvant, a est un coefficient qui dépend du diamètre de l'ion hydraté; le terme — bI permet d'étendre la relation de Debye-Hückel aux forces ioniques supérieures à 0,1. La valeur de b est en fait propre à chaque électrolyte ; toutefois, par

---

* $K_1 = (H_2CO_3)/P_{CO_2}$ $\quad K_2 = (H_3O^+)\,(HCO_3^-)/(H_2CO_3)$

$K_3 = (H_3O^+)\,(CO_3^{--})/(HCO_3^-)$; $\quad K_4 = (H_3O^+)\,(OH^-)$

$K_5 = (Ca^{++})\,(CO_3^{--})/[CaCO_3^0]$; $\quad K_6 = (Ca^{++})\,(SO_4^{--})/[CaSO_4^0]$

$K_7 = (Mg^{++})\,(CO_3^{--})/[MgCO_3^0]$; $\quad K_8 = (Mg^{++})\,(SO_4^{--})/[MgSO_4^0]$.

$$[Ca]_{tot} = [Ca^{++}] + [CaCO_3^0] + [CaSO_4^0]$$
$$[Mg]_{tot} = [Mg^{++}] + [MgCO_3^0] + [MgSO_4^0]$$
$$[Na]_{tot} = [Na^+] \; ; \quad [Cl]_{tot} = [Cl^-]$$
$$[SO_4]_{tot} = [SO_4^{--}] + [CaSO_4^0] + [MgSO_4^0]$$

$$2\,[Ca^{++}] + 2\,[Mg^{++}] + [Na^+] + [H_3O^+] - 2\,[CO_3^{--}] - 2\,[SO_4^{--}] - [Cl^-] - [HCO_3^-] - [OH^-] = 0$$

où les parenthèses désignent les activités et les crochets désignent les molarités.

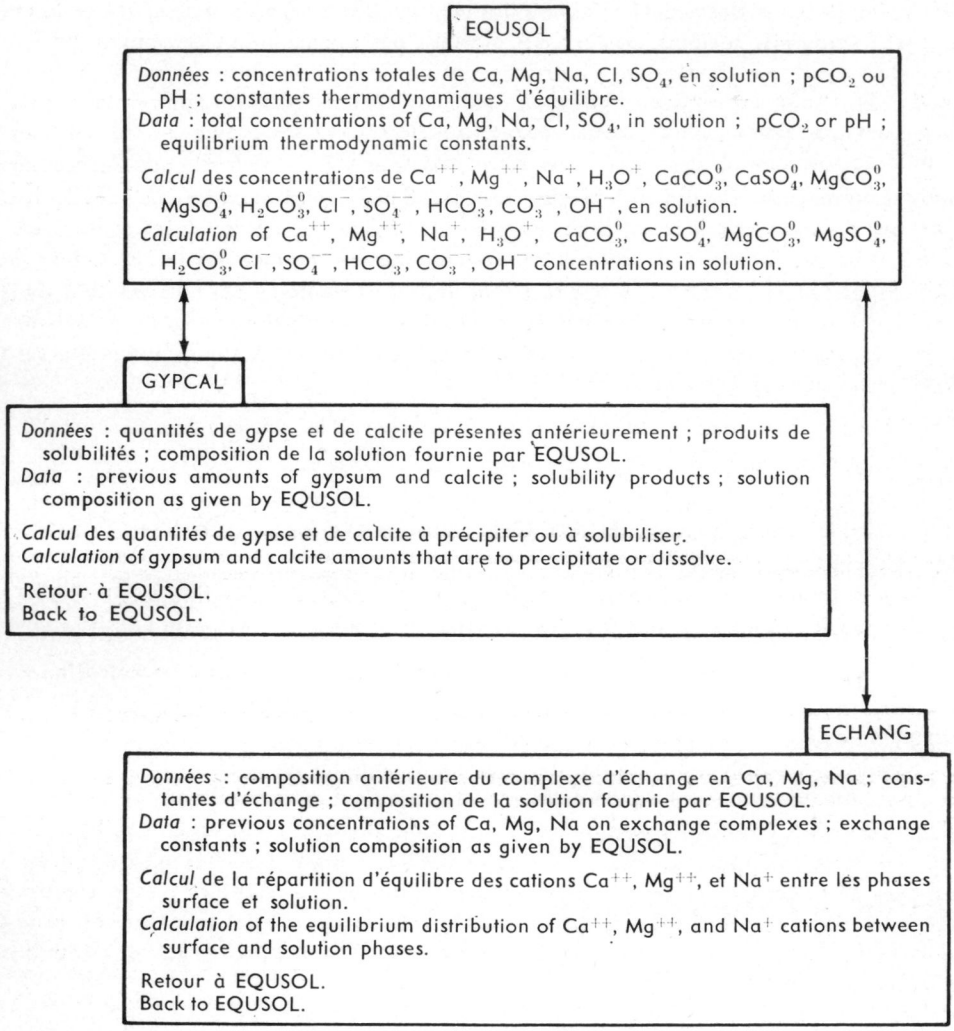


FIG. 1. — Organigramme général du programme de calcul.
A diagrammatic chart of the computer program.

manque de données, la coutume est d'étendre à toutes les solutions, les valeurs déterminées dans des solutions de NaCl. Les valeurs numériques de ces divers coefficients sont données, par exemple, dans l'article de Helgeson (1969).

Le calcul numérique des concentrations à l'équilibre est basé sur des méthodes d'approximations successives librement convergentes, excepté en ce qui concerne l'équation d'électroneutralité pour laquelle nous avons procédé de la façon suivante : à pression partielle en CO_2 fixée, EQUSOL effectue les calculs des concentrations avec une série de valeurs successives de pH arbitraires, et détermine pour chacune d'elles la charge électrique résiduelle. Lorsque cette charge change de signe, l'ordinateur revient en arrière et recommence le calcul avec un incrément de pH plus petit, jusqu'à

obtenir un nouveau changement du signe de la charge électrique. Le calcul s'arrête lorsque la précision désirée est atteinte. De façon similaire, dans le cas où l'on se fixe un pH, « l'incrémentation » porte sur la pression partielle en CO_2.

Une fois la composition d'équilibre de la solution déterminée par EQUSOL, les données sont transmises au programme GYPCAL dont le rôle est d'assurer les équilibres de solubilité du gypse et de la calcite. A cet effet, GYPCAL calcule les produits d'activités $(Ca^{++}) \times (SO_4^{--})$ et $(Ca^{++}) \times (CO_3^{--})$ fournis par EQUSOL, et les compare aux produits de solubilité qui lui ont été imposés, puis effectue les réactions de dissolution et/ou de précipitation. La nouvelle composition brute et la solution est alors renvoyée à EQUSOL pour rééquilibrage des espèces chimiques et ainsi de suite jusqu'à obtention de produits de solubilité compatibles avec les valeurs imposées.

On réalise une économie de temps de calcul, en traitant en premier lieu les équilibres concernant le gypse. En effet, le produit de solubilité beaucoup plus faible de la calcite (quatre ordres de grandeur) est tel que les modifications d'équilibre liées à la précipitation des carbonates nécessiteront rarement une révision des quantités de gypse précipité ou solubilisé déjà calculées.

Un trosième sous-programme (ECHANG) calcule les concentrations à l'équilibre pour les échanges ioniques entre les cations Ca^{++}, Mg^{++} et Na^{+}.

Dans une première étape, on considère les cations divalents de façon globale (soit $D^{++} = Ca^{++} + Mg^{++}$) et on traite les échanges $Na^{+} - D^{++}$. La recherche du point d'équilibre se fait de la façon suivante :

Soit les symboles :

— CEC (meq/g) : capacité d'échange cationique, celle-ci est supposée être entièrement saturée par les cations Ca^{++}, Mg^{++} et Na^{+} ;

— Y_0 = fraction ionique équivalente de divalents adsorbés, D^{++} (meq/g)/CEC, au départ ;

— C_0 = normalité totale de la solution d'électrolyte, $Na^{+} + D^{++}$ en meq/l ;

— X_0 = fraction ionique équivalente de divalents en solution, D^{++} (meq/l)/C_0, au départ ;

— β = masse de sol sec/volume de solution en g/l.

Le problème est de trouver les fractions Y_e et X_e qui seront atteintes lorsque l'équilibre sera établi entre la solution et le complexe d'échange. Si cet échange se fait de façon stœchiométrique, on peut montrer que lorsque la fraction équivalente de divalents adsorbés varie d'une quantité algébrique Z, la fraction équivalente de divalents en solution varie d'une quantité — R.Z, où $R = \beta . CEC/C_0$. On recherchera donc la quantité Z, telle que $Y_e = Y_0 + Z$ et $X_e = X_0 - RZ$.

Les couples d'équilibre Y_e, X_e sont d'autre part reliés par un coefficient de sélectivité K_c (Laudelout et Thomas, 1965)

$$K_{c_{(Na^{+}-D^{++})}} = \frac{2\,C_0}{1\,000} \frac{Y_e(1-X_e)^2}{(1-Y_e)^2\,X_e} \frac{\gamma^2_{Na^{+}}}{\gamma_{D^{++}}} \qquad (1)$$

où les « γ » sont les coefficients d'activité en solution. Ce coefficient de sélectivité est purement expérimental et peut varier avec la composition du complexe d'échange. Cette variation est bien décrite par une relation polynomiale du type

$$K_{c_{(Na^{+}-D^{++})}} = a_0 + a_1\,Y_e + a_2\,Y_e^2 + a_3\,Y_e^3 \qquad (2)$$

où a_0, a_1, a_2 et a_3 sont des constantes choisies pour décrire au mieux les résultats d'isothermes d'échange expérimentaux.

Partant du point de coordonnées Y_0, X_0, on donne à Z des incréments arbitraires successifs et à chaque pas on calcule le coefficient de sélectivité selon l'équation (1) pour le point de coordonnées $Y = Y_0 + Z$, $X = X_0 - RZ$. Ce coefficient de sélectivité est comparé à celui qui est caractéristique de l'équilibre et qui est donné par l'équation (2). Lorsque le point d'équilibre est dépassé, on revient d'un pas en arrière puis on repart avec de plus petits incréments de Z. Le calcul s'arrête lorsque la précision sur la valeur de Z est jugée satisfaisante.

Dans une deuxième étape, le sous-programme ECHANG établit les proportions de Ca^{++} et Mg^{++} qui interviennent dans les fractions Y_e et X_e. Ce calcul s'appuie d'une part sur la condition de conservation des quantités respectives de ces ions, et d'autre part, sur le coefficient de sélectivité caractéristique de l'échange Ca^{++}-Mg^{++}. Etant donné le peu de sélectivité des complexes d'échange pour l'un ou l'autre de ces ions, il suffira le plus souvent d'assurer une distribution telle que le rapport Ca/Mg soit identique dans les phases surface et solution. Il importe de se souvenir que cette observation est fréquente mais non générale.

Les processus d'échange ionique impliquent forcément une modification des espèces en solution. C'est pourquoi le programme principal fera alternativement appel aux trois sous-programmes jusqu'à ce que la composition de la solution ne se modifie que dans une mesure inférieure à une erreur imposée.

Validité du modèle

Description des expériences

Les déterminations expérimentales ont porté sur 5 sols tunisiens provenant de la haute vallée de la Medjerda. Ces échantillons ont été choisis pour leurs fortes teneurs en calcite (30-40 p. 100), et également en gypse dans certains cas.

Cinq grammes de ces sols mélangés à du sable pur ont tout d'abord été soumis à une percolation d'acétate d'ammonium 1 N (pH 7). Les quantités de Ca, Mg et Na extraites ont été dosées par absorption atomique (soit Ca_1, Mg_1 et Na_1). Après lavage du sol à l'alcool, l'ammonium adsorbé a été extrait par une solution de KCl 10 p. 100 et dosé par la méthode Kjeldahl (soit les quantités $A_1 = 24{,}2$, 18,4, 14,4, 19,0 et 23,4 meq/100 g ainsi obtenues pour les différents sols).

Chaque sol a également été soumis à une percolation d'acétate de sodium 1 N (pH 8,3), ce qui a permis d'extraire des quantités Ca_2 et Mg_2 de calcium et de magnésium, respectivement. Après lavage à l'alcool, une extraction à l'acétate d'ammonium 1 N a conduit à la désorption d'une quantité Na_2 de sodium (les valeurs de Na_2 étaient 24,5, 19,4 15,2, 19,2 et 23,8 meq/100 g, correspondant respectivement aux différentes quantités A_1 mentionnées plus haut).

Les différences relatives entre A_1 et Na_2 n'étaient jamais supérieures à 5 p. 100, ce qui ne peut pas être considéré comme significatif dans ce type d'analyses. Ces valeurs représentent les capacités d'échange réelles des sols étudiés.

Les quantités Ca_1 étaient de 3 à 4 fois supérieures aux quantités Ca_2. Cela s'ex-

plique aisément par les pH différents des solutions de percolation. Le pH faible de l'acétate d'ammonium a provoqué une dissolution plus importante de calcite.

Par contre, les quantités Mg_1 et Mg_2 n'étaient pas significativement différentes. On peut donc affirmer que le magnésium extrait ne provenait pas de minéraux peu solubles tels que des calcites magnésiennes. Cette observation a été confirmée par des spectres de diffraction des rayons X. On notait toujours un pic de calcite bien différencié et très aigu, qui n'était jamais suivi d'un pic caractéristique des calcites magnésiennes (Plummer et Mac Kenzie, 1974).

Pour chaque sol, on a préparé quatre pâtes par addition de 50, 70, 100 et 140 ml d'eau déminéralisée à 100 g d'échantillon de sol sec. Pour obtenir l'équilibre, les pâtes ont été agitées quatre fois par jour pendant une semaine, puis centrifugées. On a alors déterminé les concentrations en cations et anions dans les solutions extraites, ainsi que le pH.

Pour chaque système sol-eau étudié, les quantités de sodium et de magnésium adsorbées peuvent se calculer par différence entre les quantités totales, Na_1 et Mg_1 (ou Mg_2), et les quantités trouvées dans les solutions des pâtes. Le calcium adsorbé est alors obtenu par différence entre la CEC et la somme Na + Mg adsorbés.

Simulation des équilibres

Le but de la simulation était de prédire la distribution des espèces chimiques entre les différentes phases des systèmes sol-eau reconstitués.

Un premier problème concerne le choix des multiples constantes intervenant dans le programme de simulation. Les constantes thermodynamiques K_1 à K_8 peuvent être trouvées dans la littérature. On consultera par exemple le répertoire très complet de Droubi, Fritz et Tardy (1976). Les produits de solubilité du gypse et de la calcite ont également fait l'objet de nombreuses études antérieures. Toutefois, comme toutes nos pâtes étaient saturées en calcite, et certaines en gypse, nous avons préféré calculer les produits d'activités $(Ca^{++}) \times (CO_3^{--})$ et $(Ca^{++}) \times (SO_4^{--})$. A cet effet, on peut utiliser des programmes du type EQUSOL ou des programmes encore plus élaborés, comme par exemple, celui de O'Connor et Cadena (1975). Nous avons ainsi obtenu, $pK_s = 8{,}25$ ($\pm$ 0,17) pour la calcite, $pK_s = 4.85$ ($\pm$ 0,03) pour le gypse. Pour plus de généralité, toutes les simulations ont été effectuées sur la base de ces valeurs moyennes. Ces constantes sont bien dans la gamme des valeurs que l'on peut relever dans la littérature récente. On trouve, en effet, à 25 °C, des pK_s variant de 7,95 (Suarez, 1977) à 8,41 (Plummer et Mac Kenzie, 1974) pour la calcite, et de 4,60 (Wigley, 1971) à 4,86 (Kharaka et Barnes, 1973) pour le gypse.

Les constantes de la régression polynomiale (2) ont fait l'objet de déterminations indépendantes. Les nombreux travaux sur les échanges ioniques effectués dans notre laboratoire tendent à montrer que le choix d'une coefficient de sélectivité constant (de l'ordre de 7 à 12) conduit à des simulations très satisfaisantes des équilibres d'échange pour la plupart des sols nord-africains, du moins dans la gamme de taux de sodium échangeable communément rencontrés (< 30 p. 100). Il convient de noter que dans ce domaine de composition du complexe d'échange, le coefficient de sélectivité est extrêmement sensible à des variations minimes des fractions ioniques équivalentes. En d'autres termes, le choix de $K_c = 7$ ou $K_c = 12$ conduit au calcul de fractions ioniques équivalentes très peu différentes dans la pratique. Le coefficient de sélectivité

pour l'échange Ca-Mg a d'autre part été posé égal à l'unité sur la base de nombreuses déterminations expérimentales.

L'introduction des données dans le programme s'est faite de la façon suivante. On a tout d'abord chargé le complexe d'échange avec les quantités totales de sodium (Na_1) et de magnésium (Mg_1 ou Mg_2). Ces quantités étant ici toujours inférieures à la CEC, on a complété celle-ci par du calcium. Dans la solution du sol, on a introduit les quantités d'anions trouvées dans la pâte la plus diluée du sol considéré, et on y a ajouté une quantité équivalente de calcium. On a enfin fixé le rapport sol/solution propre à chaque pâte préparée.

Le programme a alors calculé les compositions d'équilibre du système. Une comparaison des résultats simulés et expérimentaux est présentée à la figure 2. Cette comparaison a porté sur la distribution des cations entre les phases solution et surface. Cet aspect est en effet le plus important du point de vue agronomique. On peut considérer que l'accord entre l'expérience et le calcul est largement satisfaisant pour la pratique (notez les valeurs absolues des échelles). Il est évident qu'un accord parfait aurait pu être obtenu pour chaque système, par ajustement des constantes utilisées dans le programme. Toutefois, agir en ce sens reviendrait à enlever tout intérêt

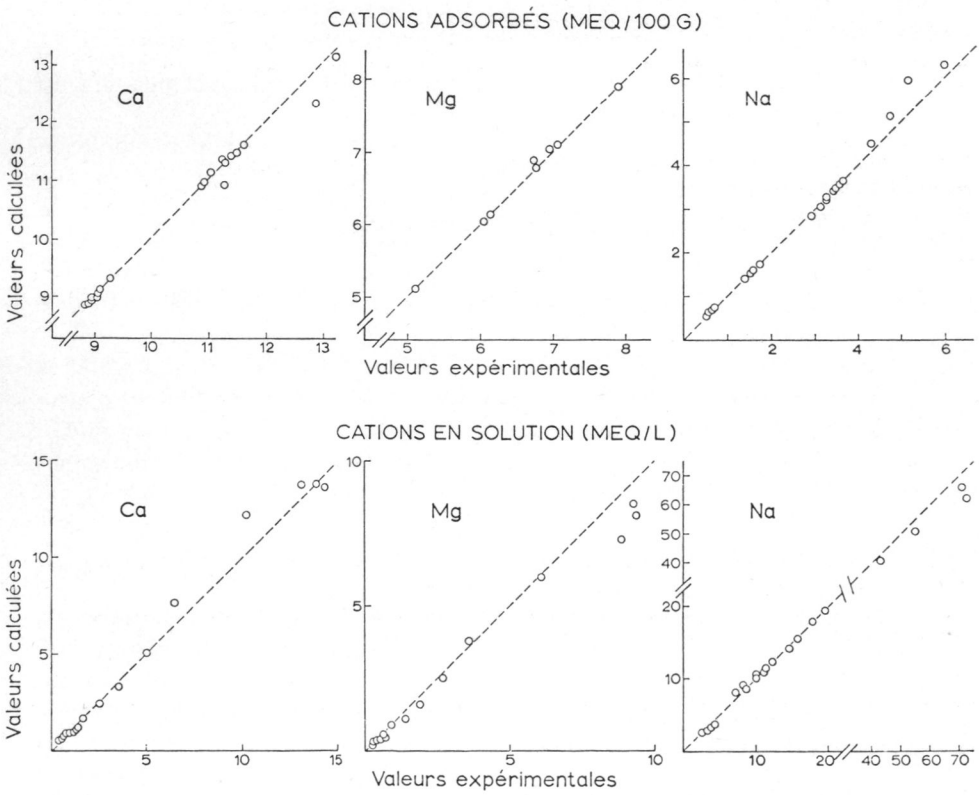


FIG. 2. — *Comparaison entre les valeurs calculées et expérimentales de la composition cationique des complexes d'échange et des solutions.*

A comparison between calculated and experimental cationic compositions of exchange complexes and solutions.

général à la simulation, et donc à la détourner de son véritable but qui est de remplacer l'expérience sur la base d'un minimum de données aléatoires.

Une simulation de mouvements de sels faisant appel huit cents fois aux trois sous-programmes nécessite environ 50 s de temps de calcul (Central Processing Unit time) sur ordinateur IBM 370/165.

Conclusion

Etant donné ses caractéristiques, le programme que nous avons conçu peut être utilisé comme composante d'un modèle général de transfert de solutés. A cet égard, il s'inscrit dans la ligne des perspectives de recherches qui ont été évoquées récemment par Ruellan (1976), dans le cadre de ses travaux sur la migration et l'accumulation des carbonates.

De plus, ce programme peut constituer un support intéressant à l'interprétation des analyses classiques de sol. Il suffit en effet d'y introduire l'humidité du sol en place, pour pouvoir calculer les équilibres qui le caractérisaient. En outre, pour le type de sols considérés, notre modèle permet de réduire notablement le nombre des déterminations analytiques. Les seules données qui ont été utilisées pour la simulation sont en effet la CEC, le sodium total, le magnésium total, les anions des pâtes les plus diluées et une estimation de la pression partielle de CO_2 ou du pH. Cette méthode de calcul présente donc l'avantage considérable de dispenser le chimiste de la nécessité de déterminer séparément les cations échangeables et les cations solubles. Quel que soit le soin apporté aux déterminations analytiques, cette séparation ne vaut que pour la teneur en eau à laquelle la séparation de la solution du sol a été effectuée. A toute autre teneur, la distribution des cations entre la solution et la surface sera différente d'autant plus que les échanges ioniques dans les sols sont essentiellement hétérovalents.

Summary

Modelization of physico-chemical equilibrium of exchange and precipitation in soil-water-electrolyte systems

This paper presents a numerical computer program that allows to calculate the equilibrium composition of soil-water-electrolyte systems. Beside the calculation of the equilibrium concentrations in solution (ions, ion-pairs, ...), two types of reactions are taken into account : the exchange processes between Ca, Mg, and Na cations, and the precipitation or dissolution of gypsum and calcite.

Laboratory experiments were performed to test the validity of that model. Soil samples were equilibrated at various water contents. After centrifuging, the extracted solutions were analysed, and the results were compared with those calculated by the program. A good agreement was obtained.

The FORTRAN program has been built so that it may be easily coupled to general models describing salt movement in irrigated soils, especially in arid and subarid zones.

Another interest of our program is that, starting from classical laboratory analysis, it gives a more realistic picture of the ionic environment in soils at water contents actually observed in natural conditions. Moreover this calculation procedure may replace part of the chemical determinations.

Zusammenfassung

Modellisierung der physikalisch-chemischen Austausch- und Niederschlagsgleichgewichte in den Systemen « Boden-Wasser-Elektrolyt »

Dieser Bericht beschreib eine numerische Methode, die es ermöglicht, die Gleichgewichtszusammensetzung eines Systems « Boden-Wasser-Elektrolyt » zu berechnen. Die im Programm betrachteten Reaktionen sind der Austausch zwischen Kalcium, Magnesium und Natrium einerseits und die Niederschläge und Zersetzungen von Gips und Kalzit anderseits. Einige Laboratoriumexperimente haben es ermöglicht, das Zutreffen der vorgeschlagenen Methode zu bestätigen.

Das FORTRAN Programm ist so beschaffen, dass es leicht auf ein generelles Modell übertragen werden kann, das die Bewegung der Salze in bewässerten Böden insbesondere undürrer und halbdürrer Gegenden beschreibt.

Daneben ermöglicht dieses Programm, von den klassischen Laboratoriumanalysen aus ein genaueres Bild der ionischen Umgebung des Bodens mit dem tatsächlich in der Natur beobachtetem Wassergehalt zu erreichen. Eine gewisse Zahl von wie gewöhnlich durchgeführten Analysen können auch durch diese Berechnung vorteilhaft ersetzt werden.

РЕЗЮМЕ

Моделирование физико-химических равновесий обмена веществ и осаждений в системе почва-вода-электролит.

Дюфей Ж. Е., Пети К. М., Гобде И., Лоделу Г.

В данной заметке описывается цифровой метод рассчета равновесного состава системы почва-вода-электролит. Программа принимает во внимание следующие реакции : обмен между кальцием, магнием и натрием, осаждения и растворения гипса и кальцита. Несколько опытов в лаборатории позволили проверить обоснованность предложенной методики.

Программа ФОРТРАН была задумана так, чтобы была возможность ее легко приложить к общей модели описывающей движения солей в орошаемых почвах, в частности в засушливых и полу-засушливых районах.

Кроме всего этого, программа эта позволяет получить, на базе классических лабораторных анализов, более точную картину ионной среды, содержащей количества воды действительно наблюдающиеся в природе. Некоторое количество обычно проводящихся анализов, можно с успехом заменить рассчетом.

Références bibliographiques

DROUBI A., FRITZ B., TARDY Y., 1976. Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **14,** 13-38.

HELGESON H. C., 1969. Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *Amer. J. Sci.*, **26,** 729-804.

KHARAKA Y. K., BARNES I., 1973. SOLMNEQ : Solution-Mineral Equilibrium Computations. *U. S. Dept. of the Interior, Geol. Serv. Computer Contribution,* Report n° USGS-WRD-73-002.

LAUDELOUT H., THOMAS H. C., 1965. The effect of water activity on ion exchange selectivity. *J. Phys. Chem.*, **69,** 339-340.

O'CONNOR G. A., CADENA F. C., 1975. Calcite equilibrium in mixed ion aqueous systems open to the atmosphere. *Soil Sci.*, **120,** 182-187.

PLUMMER L. N., MACKENZIE F. T., 1974. Predicting mineral solubility from rate data : application to the dissolution of magnesian calcites. *Am. J. Sci.*, **274,** 61-83.

RIEU M., CHEVERRY C., 1976. Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **14,** 39-61.

RUELLAN A., 1976. Synthèse et perspectives : migrations et accumulations des carbonates. *Bull. Soc. Géol. France*, **18,** 41-44.

SPOSITO G., MATTIGOD S. V., 1977. On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 323-329.

SUAREZ D. L., 1977. Ion activity products of calcium carbonate in waters below the root zone. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 310-315.

WIGLEY T. M. L., 1971. Ion pairing and water quality measurements. *Can. J. Earth Sci.*, **8,** 468-476.

Ann. agron., 1979, **30** (1), 63-88.

Un exemple d'altération superficielle naissante sur roches basiques en région tempérée humide. Cas des gabbros dioritiques de la haute vallée de la Jordanne (Cantal)

J. DEJOU *, J. GUYOT ** et J. TRICHET ***

* *Station d'Agronomie,*
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I.N.R.A.,
12, avenue de l'Agriculture, 63000 Clermont-Ferrand

** *Station de Science du Sol,*
Centre de Recherches de Dijon, I.N.R.A.,
17, rue Sully, 21034 Dijon Cedex

*** *Institut de Recherches « Ressources et Matériaux minéraux »*
ERA 601 du C.N.R.S.
Université d'Orléans, 45045 Orléans Cedex

Résumé

Un exemple d'évolution superficielle naissante, développée postérieurement à la glaciation würmienne, a été étudié sur gabbros dioritiques de la haute vallée de la Jordanne (Cantal).

Ces roches ont donné naissance à des arènes et à des sols bruns mésotrophes dont l'épaisseur totale est de 1,50 m au maximum. Les arènes sont pauvres en fractions fines : 2 à 3 p. 100 d'argile $< 2\ \mu$ et 4 à 6 p. 100 de limon (2-20 μ) ; dans les sols au contraire, ces deux phases s'accroissent de façon très nette.

Les produits secondaires issus de l'évolution de ces roches se répartissent dans plusieurs fractions granulométriques et sont constitués par deux catégories de matériaux : une phase amorphe et des minéraux argileux cristallisés parmi lesquels la vermiculite est très largement dominante.

L'évolution chimique globale est seulement plus ménagée que celles d'altérations anciennes décrites dans les mêmes ensembles géographiques et développées pendant l'ensemble des temps quaternaires. Ces dernières diffèrent des altérations très récentes par un volume global des altérites beaucoup plus important, une évolution plus poussée des minéraux secondaires, traduite en particulier par la présence de kaolinite et par une évolution chimique totale un peu plus active, estimée d'après l'indice d'altération de Parker.

I. — Introduction

En France, les affleurements de gabbros sont relativement rares et toujours d'une extension réduite. Les plus importants sont localisés en Corse, à Piana-Canale, Santa Maria Figaniella, Lévie et l'Inzecca où ils constituent des massifs en enclaves dans des granites ou des formations cristallophylliennes (Maisonneuve, 1961). On rencontre un autre massif en Loire-Atlantique au Pallet, dont l'évolution géochimique superficielle a fait l'objet d'une étude approfondie de la part de Ildefonse (1978). Enfin, dans la haute vallée de la Jordanne (Cantal), en amont du village de Rudez, Lacroix (1909), Boisse de Black (1939) et Vatin-Pérignon (1966) ont décrit successivement des petits

gisements de roches plutoniques basiques, intrusifs dans la masse considérable des brèches volcaniques, de nature surtout trachytique et d'âge miocène, formant l'ossature du massif du Cantal.

Lacroix (1909) attribue à ces roches hypovolcaniques un âge pliocène et les trois auteurs cités y ont reconnu essentiellement deux faciès pétrographiques : des monzonites à biotite et des gabbros essexitiques.

La superficie de ces massifs est très faible ; celle du gisement qui va être étudié ici ne dépasse pas une centaine de mètres de longueur de part et d'autre de la vallée de la Jordanne, sur une largeur de 50 à 80 m. Cependant, malgré leur extension géographique très réduite, l'examen de l'évolution superficielle de ces matériaux s'est révélée très intéressante ; elle a permis en effet de prolonger l'étude des diorites déjà abordée lors de travaux antérieurs (Chevalier, 1970 et 1971 ; Dejou *et al*, 1972) et de compléter ainsi les données acquises sur l'évolution des roches basiques en mettant en évidence certaines caractéristiques physico-chimiques particulières de leur complexe d'altération. Enfin, l'un des traits les plus remarquables de l'altération étudiée est qu'elle s'est déroulée sur une période de temps très courte, évaluée à 10 000 ans environ.

II. — Examen pétrographique des Gabbros dioritiques du Cantal, roches-mères à caractères mixtes

1. — *Composition minéralogique de ces roches*

Quatre échantillons à faciès de gabbros ont été recueillis dans le massif, deux à proximité immédiate de la rivière La Jordanne (n°s 21 et 51) et les deux autres sur le versant droit de la vallée (n°s 31 et 41). Dans tous les cas, la roche est de teinte sombre avec parfois des zones encore plus foncées correspondant à une concentration locale de barylites ou à la présence de petites enclaves très basiques ; la structure est typiquement grenue et la taille des cristaux d'ordinaire très petite (0,5 à 2 mm), ce qui donne un faciès tout à fait comparable à celui des gabbros du Mont Mégantic, Québec, étudiés actuellement par de Kimpe *et al.* (1978). Toutefois, on enregistre des différences dans la taille des minéraux, notamment des plagioclases et de l'augite : en effet, quelques porphyroblastes de feldspaths peuvent atteindre jusqu'à 2 cm de longueur (n° 41) et les augites 0,6 cm (n° 51). Enfin, certains échantillons sont affectés par une cataclase reconnaissable surtout à la fracturation des biotites.

Les minéraux constituants sont les suivants :

a) *Minéraux essentiels.*

Plagioclases : *Labrador ou Andésine-Labrador* : très abondant, toujours dominant dans la roche, souvent zoné et disposé en lattes ; son aspect est aussi variable que dans les granites ou les diorites ; il peut en effet être très sain, sans trace d'altération, avec des clivages nets, ou au contraire transformé de façon plus ou moins importante en séricite ; la séricitisation s'amorce le long des clivages et s'irradie dans le cristal, mais d'une manière relativement hétérogène. Le feldspath peut englober d'autres cristaux tels la biotite et surtout l'augite en se moulant parfaitement sur ses bords, rappelant ainsi la structure intersertale des dolérites.

Microline : beaucoup moins abondant que les plagioclases ; il peut englober des fragments d'autres minéraux tels que l'augite.

Augite : très nombreux cristaux faiblement colorés en lumière naturelle ; certains sont affectés de microfractures plus ou moins parallèles qui simulent des directions orthogonales, mais qui n'en sont pas et présentent de plus la macle h_1. D'autres minéraux peuvent se trouver englobés au sein des cristaux ou dans les clivages, par exemple l'apatite ou des minéraux opaques. La taille des cristaux d'augite est du même ordre de grandeur que celle des plagioclases, mais toujours inférieure à celle des porphyroblastes. La présence de ce minéral a une très grande importance pour la classification de la roche.

Biotite : abondante, très brune, pléochroïque, avec quelques plages déchiquetées ; elle recoupe l'augite et lui est donc postérieure. Elle est toujours saine, non transformée en chlorite.

Hornblende : pléochroïque, de teinte variable, verte, mais aussi brune (n° 21), cette dernière caractéristique rappelant les roches volcaniques ; elle peut être absente dans les préparations microscopiques ; elle est en général moins abondante que l'augite à laquelle elle se trouve associée.

b) *Minéraux accessoires.*

Apatite, en cristaux de grande taille et abondants.

Minéraux opaques, très abondants, surtout ilménite.

Zircon, rare.

Sphène, peu abondant.

Feldspathoïdes, pratiquement absents dans les échantillons étudiés et très difficiles à déceler. Toutefois dans le n° 41, caractérisé par un certain déficit de SiO_2, le calcul de la norme fait apparaître une part de néphéline.

TABLEAU 1

Composition minéralogique approchée des gabbros dioritiques du Cantal
(Résultats donnés en p. 100 du poids de l'échantillon)

Approximate mineralogical composition of dioritic gabbros from the Cantal
(Results in p. 100 weight of sample)

Minéraux constituants	N° 21	N° 31	N° 41	N° 51	(N. Vatin-Pérignon) Composition modale d'un gabbro essexitique du Cantal
Apatite	1,7	1,2	1,7	2,0	1,5
Minéraux opaques (ilménite)	4,0	5,3	5,5	4,4	4,4
Sphène	—	—	—	—	1,6
Andésine-Labrador	44,0	51,0	35,0	45,0	42,0
Microcline	6,0	10,0	10,0	5,0	10,5
Néphéline	—	—	5,0	—	2,6
Autres feldspathoïdes	—	—	—	—	1,9
Biotite	18,0	8,0	18,0	17,0	10,0
Hornblende	13,0	—	10,0	13,0	8,5 (y compris l'ouralite)
Augite	14,0	12,0	13,0	12,0	16,7
Total	100,7	97,5	98,2	98,4	99,6

Le tableau 1 donne une estimation approchée de la composition minéralogique de ces roches que les calculs de quelques paramètres pétrographiques amènent à classer parmi les gabbros dioritiques. Mais il faut bien souligner toute la difficulté de cette estimation, surtout dans le cas de la paragenèse complète à microcline, biotite, hornblende et augite. Le pourcentage des trois premiers minéraux a été évalué à partir des analyses chimiques et en choisissant des formules générales qui diffèrent sans aucun doute plus ou moins de celles des constituants de ces roches. L'augite a été calculée à partir de Al_2O_3 restant, après formation de tous les autres minéraux.

Le tableau montre que des variations relativement marquées peuvent affecter la composition des gabbros dioritiques de la vallée de la Jordanne, surtout en ce qui concerne les fedspaths et la hornblende, tandis que les pourcentages de l'augite et surtout de la biotite demeurent constants. Cette composition qualitative et même quantitative se retrouve à peu de choses près dans les gabbros essexitiques décrits dans le secteur par Vatin-Pérignon (1966), à l'exception toutefois des feldspathoïdes identifiés dans tous les échantillons par cet auteur et représentés par plusieurs espèces : néphéline altérée, sodalite et analcime. Il en résulte ainsi un déficit un peu plus accusé en SiO_2 qui donne à ces matériaux une empreinte essexitique que nous n'avons pas généralement retrouvée dans le gisement étudié. C'est dire les nuances assez sensibles qui se rencontrent dans un massif de roches basiques pourtant de superficie très limitée.

2. — *Composition chimique des Gabbros dioritiques et paramètres chimico-minéralogiques*

Analyses chimiques.

Elles figurent dans le tableau 2. Si l'on peut déceler quelques variations relativement accusées dans les teneurs de certains constituants, en particulier pour Fe_2O_3, tandis qu'elles sont moins marquées pour d'autres, comme K_2O et Na_2O, on constate dans l'ensemble une relative homogénéité dans la composition chimique de ces roches. Celle-ci est bien exprimée dans le triangle de concentration de Niggli où les points représentatifs de ces matériaux sont très rapprochés et localisés autour de la ligne de saturation.

Mais le calcul de quelques paramètres chimico-minéralogiques va permettre une caractérisation plus précise de ces roches.

Paramètres chimico-minéralogiques.

Les paramètres suivants ont été calculés : Saturation (SAT), coloration (COL), k et mg suivant Nockolds (1954), p = coupholites/barylites, R et S de Jung et Brousse (1954) et Brousse et Thiébault (1968). Les trois premiers sont intermédiaires entre ceux des gabbros et des diorites ; les valeurs de p sont caractéristiques des diorites et celles de R et S du clan des gabbros.

Aussi, compte tenu d'une part de l'importance de l'augite dans la composition minéralogique de ces roches qui les fait ranger dans le groupe des gabbros, mais aussi d'autre part des caractères pétrographiques mixtes bien soulignés par les divers paramètres qui atténuent cette appartenance, nous proposons de les désigner par le terme de gabbros dioritiques.

TABLEAU 2

Analyses chimiques et paramètres pétrographiques de quatre échantillons de gabbros dioritiques de la haute vallée de la Jordanne (Cantal)

Chemical analysis and petrographical parameters of 4 dioritic gabbros samples from the high valley of Jordanne river (Cantal)

Constituants chimiques	N° 21	N° 31	N° 41	N° 51
H_2O^-	0,55	0.90	0,50	0,35
H_2O^+	1,96	2,00	2,50	2,07
SiO_2	49,00	52,50	49,50	49,20
Al_2O_3	16,50	17,20	17,50	16,50
Fe_2O_3	4,79	2,70	1,90	4,49
FeO	4,43	3,65	4,76	4,43
TiO_2	3,40	2,20	2,50	3,40
P_2O_5	0,78	0,53	0,80	0,87
MnO	0,19	0,17	0,19	0,19
CaO	8,30	6,50	8,10	8,30
MgO	3,65	2,95	3,45	3,80
K_2O	2,75	3,20	3,30	2,40
Na_2O	3,75	4,35	4,10	3,40
Total	100,05	98,85	99,10	99,40
Paramètres C.P.I.W.	II, 5, 3′ 4 [3 (1) 2, 2 (2) 3′]	II, 5 (2) 3′ ′4 [(2) 3, 1, 2′, 3]	II, 5′, 3 (3) 4 [2, 2, 2 ; 3]	II, 5, 3′ 4 [3′, 1, 2 (2) 3]

Analystes : Rouiller et Souchier (Nancy, 1975).

III. — Caractères généraux de l'altération des gabbros dioritiques du Cantal

L'altération des gabbros dioritiques du Cantal présente deux caractéristiques essentielles.

1. — *Elle est sous l'étroite dépendance de la topographie* qui est très accusée dans la région avec de fortes pentes où l'on observe simplement un sol brun mésotrophe de faible épaisseur. Mais en position de replat, l'évolution peut se développer et les arènes et les sols se maintenir pour donner un profil tout à fait identique à ceux développés sur granite.

Les horizons sont les suivants :

a) A la base, la roche fraîche R pratiquement inaltérée.

b) Puis la roche altérée en boules, comme dans le cas des granites ; ces boules sont composées d'une succession d'écailles qui se desquament à la façon de celles d'un oignon.

c) L'arène C (40-150 cm maximum), 10 YR 4/5 à 5/6 à l'état sec, parcourue par des diaclases de faible épaisseur, toujours anastomosées et bien soulignées par leur coloration rouge due à la circulation du fer. Des boules de faible taille (diamètre voisin de 10 cm), plus altérées que celles de la base du profil se maintiennent au sein de cette formation. La texture est essentiellement sableuse.

d) Enfin un sol brun mésotrophe A (0-20 à 40 cm) comprenant deux sous-horizons : A_{12} (20-40 cm), 10 YR 4/3, de texture limono-sableuse avec une esquisse de structure polyédrique et A_{11} (0-20 cm) plus foncé à cause de la matière organique, 10 YR 4/2, de même texture, mais à structure grenue et avec une forte densité racinaire due à des espèces uniquement prairiales.

Ce profil est tout à fait identique à ceux que l'on peut observer en Corse sur les gabbros du secteur de Lévie et à ceux décrits par Basham (1974) sur les gabbros de l'Aberdeenshire.

2. — *An second lieu, cette altération qui ne semble pas avoir reçu d'apports allochtones, peut être datée comme postérieure à la glaciation würmienne* qui a affecté l'ensemble des vallées du massif volcanique du Cantal et qui a déblayé en particulier les arènes antérieures. Elle fournit de ce fait une mesure de l'intensité des phénomènes d'altération depuis environ 10 000 ans qui ont ainsi élaboré 150 cm d'arène et de sol, soit en moyenne 1,5 cm par siècle en supposant une érosion nulle.

Il faut souligner que cette vitesse d'évolution est plus rapide que celles mentionnées dans l'ouvrage de Godard (1977).

IV. — Ameublissement superficiel des gabbros dioritiques

L'importance de la désagrégation physique des gabbros dioritiques a été appréciée grâce aux analyses granulométriques effectuées sur quatre coupes dont deux seulement comportent une arène. La micro-division de la roche est partout intense, puisque

dans tous les horizons, 80 à 100 p. 100 du matériau global a une dimension inférieure à 2 mm, ce qui rapproche l'altération de ces roches de celles des diorites (Dejou *et al.*, 1972).

Si l'on étudie désormais la composition de la phase inférieure à 2 mm, on retrouve pour les matériaux des arènes et des sols les caractéristiques déjà soulignées pour les granites, diorites et roches cristallophylliennes des régions tempérées humides.

1) Les arènes développées sur gabbros dioritiques sont pauvres en argile $< 2\ \mu$ (2 à 3 p. 100) et en limon 2-20 μ (4 à 6 p. 100), alors que le pourcentage des sables grossiers 200-2 000 μ est largement dominant (50 à 70 p. 100).

2) Dans les sols, la phase argileuse $< 2\ \mu$ devient 5 fois supérieure : 12 à 15 p. 100 et la proportion de limon oscille entre 16 et 17,5 p. 100 ; corrélativement, la part des sables grossiers s'abaisse autour de 30 p. 100, ceci dans les situations relativement planes. En position de forte pente, où l'entraînement des masses fines est actif, la part de l'argile et du limon demeure plus modeste : 6 et 11 p. 100 respectivement. On retrouve donc, grâce à la granulométrie, les deux processus classiques de l'altération qui se succèdent dans le temps, d'abord l'arénisation suivie de la phase de pédogenèse.

Courbes cumulatives

La composition granulométrique moyenne des arènes et des sols situés en position plane où le développement du profil est maximum, est représentée dans la figure 1

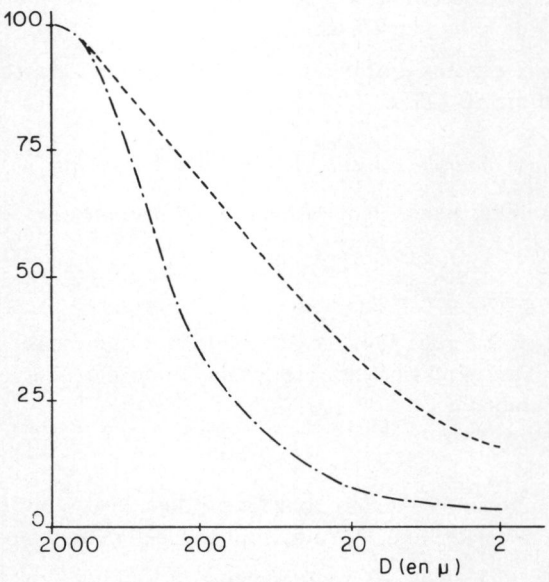


FIG. 1. — *Courbes cumulatives représentant la composition granulométrique des sols et des arènes sur gabbros dioritiques du Cantal en position relativement plane (fraction < 2 mm).*

·—·—·—·—· Arène (Sandy soil).
---------- Sol (Soil).

Cumulative curves showing the distribution of grain size in soils and sandy soils on dioritic gabbros in relatively flat position in the Cantal (fractions < 2 mm).

par les courbes cumulatives tracées en portant en abcisse les dimensions des particules et en ordonnée les pourcentages cumulés.

Tout comme pour les diorites (Chevalier, 1971 ; Dejou *et al.*, 1972), on retrouve deux types de courbes, l'une représentative des arènes et proche du type n° 2 de Mériaux (1962) et l'autre caractéristique des sols, située au-dessus de la première et rappelant le type n° 1 de l'auteur précité.

Ainsi, la désagrégation superficielle des gabbros dioritiques présente de grandes analogies avec celles des diorites, ce qui constitue un trait d'union supplémentaire entre les deux familles de roches.

V. — Évolution géochimique des gabbros dioritiques

A. — *Nature des produits secondaires élaborés au cours des premiers stades de l'évolution*

Afin d'étudier les produits secondaires issus de l'altération de ces roches, les fractions $< 2\ \mu$, 2-20 μ et 20-125 μ contenues dans les horizons de deux profils complets (nos 3 et 4) ont été séparées par granulométrie et analysées par plusieurs techniques.

Deux catégories de matériaux essentiels ont été identifiées :

1) *Une phase amorphe* présente dans tous les échantillons sans exception dans les fractions de taille comprise entre 0 et 50 μ ; toutefois, celle-ci n'a pas été recherchée dans les matériaux de taille plus élevée.

2) *Des minéraux argileux cristallisés* décelés dans toutes les fractions analysées, y compris dans la phase 50-125 μ.

1. *Examen de la phase amorphe contenue dans les arènes et les sols.*

Plusieurs techniques permettent de détecter la présence de cette phase non cristalline.

1. *Test NaF de Fieldes et Perrot* (1966).

Il s'est révélé positif pour tous les échantillons, comme pour les allophanes des sols volcaniques ; il est le plus net dans le cas de la phase argile $< 2\ \mu$, qui est la plus riche en produits amorphes.

2. *Rayons X.*

Ils n'ont donné aucune réflexion pour les produits bruts non traités ; après dissolution de la phase non cristalline, les raies apparaissent mettant en évidence des minéraux argileux.

3. *Thermogravimétrie* (fig. 2).

Les courbes thermo-pondérales des particules $< 2\ \mu$ et 2-20 μ, mais aussi 20-50 μ, extraites des divers horizons des arènes et des sols, montrent un départ d'eau très important entre 0-200° et 200-400 °C, suggérant ainsi la présence d'une phase non

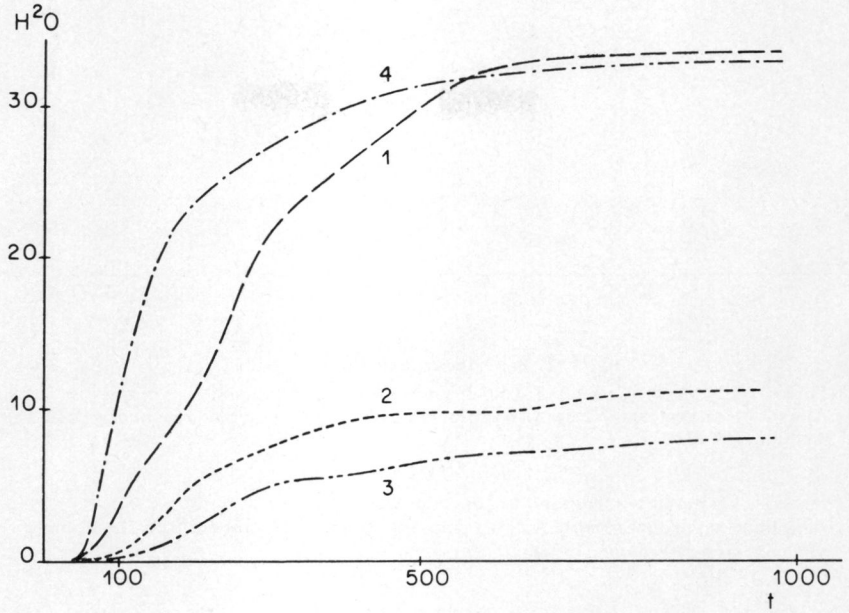


FIG. 2. — *Courbes thermo-pondérales.*

1) N° 331. — Phase $< 2\ \mu$ extraite de l'arène (120-150) cm sur gabbros dioritiques.
2) N° 332. — Phase 2-20 μ.
3) N° 333. — Phase 20-50 μ.
4) Allophane de Mitsosuchi (Japon), d'après Kitagawa (1974).

Thermo-gravimetric curves.

1) N° 331. — Phase $< 2\ \mu$ extracted from sandy soil (120-150) cm on dioritic gabbros.
2) N° 332. — Phase 2-20 μ.
3) N° 333. — Phase 20-50 μ.
4) Allophane from Mitsosuchi (Japan) after Kitagawa (1970).

cristalline ; leur allure rappelle celle des allophanes des sols volcaniques du Japon (Yoshinaga et Aomine, 1962 ; Kitagawa, 1974).

4. *Spectroscopie infra-rouge* (fig. 3).

Elle n'a été utilisée que pour les échantillons de la fraction $< 2\ \mu$; on retrouve les spectres obtenus par les auteurs précités, pour la phase amorphe dérivée de cendres volcaniques du Japon. A savoir des bandes plus ou moins nettes où l'on peut cependant identifier la présence d'une bande de vibration de valence des OH de constitution autour de 3 430 cm^{-1} qui peut d'ailleurs varier dans une certaine mesure, une bande à 1 630 cm^{-1} dans la zone des vibrations de déformation OH des molécules d'eau, enfin une bande à 1 030 cm^{-1} qui est à rapporter aux vibrations de la liaison Si-O.

Dans les trois fractions $< 2\ \mu$, 2-20 μ et 20-50 μ, la phase amorphe a été extraite suivant la méthode de Follett *et al.* (1965), où l'on utilise comme dissolvant sélectif des substances mal cristallisées Na_2CO_3 à 5 p. 100, à 70 °C durant 2 h ; selon Nguyen Kha (1973), ce réactif a l'avantage d'être peu agressif vis-à-vis des minéraux argileux associés.

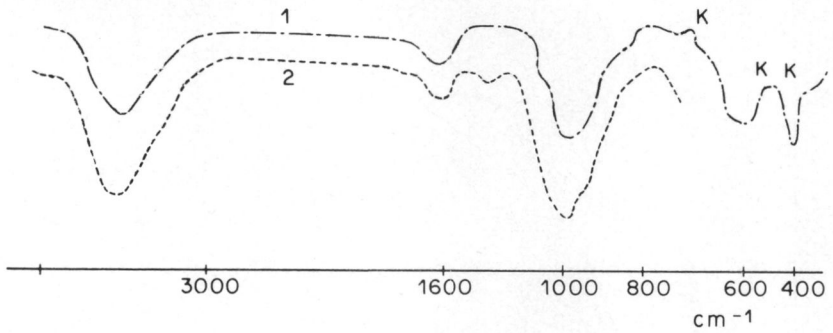


FIG. 3. — *Spectroscopie infrarouge.*

1) Phase < 2 μ extraite du sol n° 361 (0-20) cm sur gabbro dioritique.
2) Allophane de la phase < 2 μ d'un andosol (25-55) cm de Kumamoto (Japon) d'après Yoshinaga-Aomine (1962).

Infrared spectroscopy.

1) Phase < 2 μ extracted from soil (0-20) cm on dioritic gabbro.
2) Allophane separated from the < 2 μ phase of andosoil (25-55) cm from Kumamoto (Japan) after Yoshinaga-Aomine (1962).

1.1. *Composition chimique de la phase amorphe issue de l'évolution des gabbros dioritiques.*

Le tableau 3 montre que cette phase amorphe est constituée essentiellement dans tous les niveaux du profil et quelle que soit la taille des particules, de SiO_2 et Al_2O_3, com-

TABLEAU 3

Analyses de la phase amorphe issue de l'évolution superficielle des gabbros dioritiques du Cantal

Analysis of the amorphous phase derived from weathering of dioritic gabbros from the Cantal

N° échantillon	Dimension des particules (en μ)	Horizon	Profondeur (en cm)	Composition de la phase amorphe (p. 100 de chaque fraction)			Total	SiO_2/Al_2O_3 moléculaire
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3		
331	< 2 μ	C	120-150	3,18	3,38	0,52	7,08	1,60
332	2-20 μ			0,55	2,90	0,25	3,70	0,32
333	20-50 μ			0,26	1,70	0,17	2,13	0,26
341	< 2 μ	C	60-100	2,23	4,93	0,47	7,63	0,77
342	2-20 μ			1,62	3,80	0,26	5,68	0,73
432	2-20 μ	C	100-150	0,76	3,82	0,42	5,00	0,34
361	< 2 μ	A	0-20	4,21	6,81	0,57	11,59	1,05
362	2-20 μ			3,43	4,96	0,13	8,52	1,17
441	< 2 μ	A	0-20	2,67	6,45	0,30	9,42	0,70
442	2-20 μ			2,85	4,80	0,23	7,88	1,00
443	20-50 μ			1,07	1,87	0,38	3,32	0,97

Analyste : Mme Jacquin, INRA de Dijon.

position qui correspond à celle des allophanes typiques définis comme des « silicates d'alumine hydratés » (Ross et Kerr, 1934). Il s'y ajoute une part de Fe_2O_3, toujours très faible mais de même ordre de grandeur que celle des andosols des régions subtropicales développés sur andésites et dacites jeunes (Kitagawa, 1973). Cette caractéristique la différencie très fortement des allophanes contenus dans les andosols sur basaltes anciens du Massif Central où Fe_2O_3 amorphe représente alors 40 à 80 p. 100 du Fe_2O_3 total (Hétier, 1975).

Les pourcentages de SiO_2 et Al_2O_3 de ces matériaux peuvent être très différents comme le précise le tableau 3.

Dans le Cantal, nous avons affaire surtout à des produits riches en Al_2O_3, surtout dans les phases 2-20 μ et 20-50 μ, avec un rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 souvent inférieur à 1, tout comme dans les andosols du Massif Central (Hétier, 1975). Ces résultats les différencient de ceux des andosols des zones subtropicales (Yoshinaga et Aomine, 1962 ; Yoshinaga, 1966) où le rapport est souvent compris entre 1,3 et 2,0 traduisant une richesse en SiO_2 plus élevée, mais peut atteindre et dépasser 4,0 dans le cas des andosols jeunes (Trichet, 1970).

1.2. *Conclusions.*

La présence d'une phase amorphe est donc nette dans l'altération des roches basiques, *de structure grenue*, en région tempérée humide. Elle se développe aussi bien dans les arènes que dans les sols, ce qui confirme les résultats de Basham (1974) et cela, dès les premiers stades de l'évolution superficielle, observation qui corrobore celles de Chesworth pour des granodiorites au Canada (1976). Son importance globale correspond à celle des andosols de la même zone climatique (Hétier, 1973 ; Moinereau, 1977).

Leur richesse en Al_2O_3 permet de supposer qu'elle dérive des plagioclases (Snetsinger, 1967), qui en se décomposant sous l'action combinée de l'hydrolyse et du lessivage, donneraient des produits similaires aux allophanes de dégradation.

Ces résultats confirment que les produits amorphes ne sont pas l'apanage exclusif des sols volcaniques, comme l'avait déjà montré Gac (1968). Il est intéressant de souligner qu'ils confèrent aux sols bruns mésotrophes développés sur gabbros dioritiques du Cantal, profondément différents des sols volcaniques par la nature et la structure de leur roche-mère, la taille de leurs constituants granulométriques et la répartition des bases échangeables, des caractères andiques indiscutables.

2. *Les minéraux argileux cristallisés.*

2.1. *Examen des fractions* $< 2\,\mu$.

a) *Identification d'une vermiculite largement dominante.*

Après dissolution sélective de la phase amorphe, il est possible d'étudier à l'aide des rayons X la fraction restante.

Le dépouillement des diagrammes permet d'enregistrer les distances réticulaires suivantes (en Å) pour l'échantillon 361 (horizon A_{11} = 0-20 cm) choisi comme type et saturé par $Mg^{++}N$: 14,0 (TF), 10,1 (tf) 7,2 (m), 4,8 (f) 3,6 (f).

Toutes ces raies subsistent sans modification lors du traitement par le glycérol ; elles disparaissent par le chauffage à 400 °C dans l'échantillon traité par K^+ à l'exclusion d'une raie qui se maintient à 10,5 Å et qui annonce *une vermiculite hydroxyalumi-*

TABLEAU 4

Analyses chimiques des phases fines des arènes et des sols développés sur gabbros dioritiques
(Résultats en p. 100 pondéraux)

Chemical analysis of fine phases of sandy soils and soils developed on dioritic gabbros
(Results in p. 100 weight)

Eléments	Phase < 2 μ				Phase 2-20 μ			Phase 20-50 μ	
	N° 331 Arène (120-150)	N° 341 Arène (60-100)	N° 361 Sol (0-20)	N° 441 Sol (0-20)	N° 342 Arène (60-100)	N° 362 Sol (0-25)	N° 442 Sol (0-20)	N° 333 Arène (120-150)	N° 443 Sol (0-20)
H_2O^-	6,80	7,65	9,04	8,00	2,00	2,13	2,05	2,98	1,10
H_2O^+	21,77	23,10	13,05	12,73	6,57	5,50	5,46	4,58	2,75
SiO_2	36,40	35,00	38,15	39,05	46,10	54,65	53,55	47,00	52,00
Al_2O_3	17,50	16,50	20,40	20,85	19,40	16,50	16,80	16,60	15,50
Fe_2O_3	6,61	4,40	8,63	8,70	13,10	9,80	9,50	9,70	10,50
FeO	4,50	5,86	0,87	0,73	0,73	0,35	0,42	0,28	1,35
MnO	0,47	0,35	0,15	0,13	0,36	0,12	0,12	0,44	0,17
TiO_2	1,40	1,35	3,30	2,40	2,52	3,30	2,60	4,45	4,20
P_2O_5	1,60	1,35	3,53	3,50	0,46	0,37	1,10	1,60	0,64
CaO	0,35	0,80	0,11	0,11	1,90	1,00	1,00	4,55	4,00
MgO	1,80	1,50	2,40	2,20	2,67	1,90	2,05	3,10	2,70
K_2O	1,05	0,85	0,97	0,73	1,57	2,00	2,05	1,75	2,10
Na_2O	0,70	1,30	0,36	0,13	2,41	2,65	2,25	2,53	3,00
Total	100,95	100,01	99,96	99,40	99,79	100,27	98,95	99,56	100,01
SiO_2/Al_2O_3	3,53	3,60	3,17	3,18	4,04	5,63	5,40	4,80	5,70

Analystes : F. Cantagrel et S. Couturie, Laboratoire Géologie, Clermont-Ferrand (mai 1975).

neuse 2/1 *Al* (Seddoh *et al.*, 1969) ; une part infime de mica ou d'illite est associée à cette vermiculite. Quant aux raies à 3,20 (m), 3,00 (f) et 2,94 (t), elles sont attribuées aux plagioclases.

Il est toutefois possible que la raie à 7,2 Å (002 de la vermiculite) corresponde aussi à la raie 001 d'un minéral 1/1 qui pourrait être la kaolinite ou la métahalloysite. Cependant la part de ce minéral doit être très minime car on n'observe aucune des autres raies caractéristiques dans les diagrammes de rayons X, pas plus que le crochet typique entre 400° et 600 °C dans les courbes thermogravimétriques.

Il faut aussi ajouter que la technique de Nadeau (1961) décèle une fraction *de montmorillonite*, mais seulement dans les arènes et non dans les sols ; par contre, les diagrammes la mettent en évidence d'une façon très nette dans les phases 2-20 μ. Il est possible que la dissolution de la phase non cristalline relativement importante dans la fraction $< 2\ \mu$ n'ait pas été suffisamment poussée et masque de ce fait les raies de diffraction de la smectite.

En conséquence, en dehors de la phase amorphe, la vermiculite constitue l'espèce minéralogique *très largement dominante des fractions* $< 2\ \mu$; elle se développe aux dépens de la biotite, très abondante dans ces gabbros dioritiques mais peut-être aussi des plagioclases (Ildefonse, 1978), et aussi de l'augite, plus vulnérable que la hornblende, selon le schéma de Basham (1974).

Il est intéressant de noter que la vermiculite caractérise aussi l'évolution des gabbros du Pallet où elle est associée à une beidellite (Ildefonse, 1978). Mais on la rencontre aussi dans les produits des premiers stades d'altération d'autres matériaux du Bouclier canadien, de tendance basique : gneiss amphibolitiques, trondjehmites gneissiques, granodiorites de l'Ontario (Chesworth, 1976). D'autre part, cette argile se rencontre aussi dans les sols basaltiques des régions tempérées où selon Moinereau (1975 et 1977), elle constitue un héritage des micas du socle cristallin transformés dans les sols en place, tandis que Yamada et Shoji (1975) en font un produit d'évolution dérivé des cendres basaltiques, ce qui établit une excellente analogie avec l'altération de leurs équivalents éruptifs.

b) *Analyses chimiques des fractions* $< 2\ \mu$ (*tabl.* 4).

On enregistre à l'intérieur d'un même profil (n° 3) des variations assez sensibles dans la composition de ces fractions, notamment dans les teneurs en H_2O^+, Al_2O_3, Fe_2O_3, expliquées par les différences de constitution des phases amorphes et aussi de celles des vermiculites ; il faut aussi noter les hautes teneurs en TiO_2 et P_2O_5 contenues dans les sols. Dans tous les cas, le rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 est supérieur à 3, ce qui corrobore la présence de minéraux argileux 2/1 et indique le domaine de la bisiallitisation franche.

2.2. *Examen des fractions* 2-20 μ.

a) *Composition minéralogique de ces fractions.*

Les minéraux identifiés par les rayons X grâce aux divers traitements classiques varient en fonction des niveaux des profils, comme le précise le tableau 5.

Dans les arènes profondes, entre 100-150 cm, on rencontre :

a) *Une vermiculite* qui a le même comportement que les minéraux hydroxy-alumineux 2/1 Al. En effet, après saturation K^+, tout comme pour la phase $< 2\ \mu$, le

TABLEAU 5

Minéralogie des fractions 2-20 μ des arènes et sols sur gabbros (profils 3 et 4)
Mineralogy of 2-20 μ fractions of sandy soils and soils on gabbros (profiles 3 and 4)

Niveau des profils	Arène profonde C (100-250) cm	Arène moyenne C (60-100) cm	Sol A (0-20) cm
Minéraux argileux	Vermiculite hydroxyalumineuse Interstratifié mica-vermiculite Montmorillonite typique issue des Plagioclases	Vermiculite hydroxyalumineuse Interstratifié mica-vermiculite Montmorillonite moins abondante et non dérivée des Plagioclases	Vermiculite seule
Minéraux primaires constants dans tous les niveaux	Plagioclases, Biotite et Augite		
Autre minéral primaire spécifique du profil N° 4	Hornblende		

chauffage à 400 °C ne provoque pas la fermeture complète à 10 Å et l'on atteint le plus souvent que 11 Å et parfois au mieux 10,5 Å.

b) *Un interstratifié mica-vermiculite presque régulier à* 11,9 Å.

c) *Une montmorillonite typique* (fig. 4) gonflant à 17,7 Å à l'éthylène-glycol après traitement K^+ et dérivée sans doute des plagioclases (Robert, 1975).

Dans les arènes moyennes (60-100) cm, on retrouve la même vermiculite et l'interstratifié 10-14 Å. La montmorillonite est également présente, caractérisée par sa raie à 17,7 Å à l'éthylène glycol, mais il n'y a plus gonflement à 17,7 Å après traitement K^+, la raie fondamentale demeurant alors à 14,25 Å ; il ne s'agit donc plus de motmorillonite dérivée des plagioclases, mais des biotites (Robert, 1975).

Dans les sols (0,20 cm), le seul minéral argileux est la vermiculite, identique à celle des arènes.

Remarque. — Il faut ajouter à cet assemblage et dans tous les horizons des profils, les minéraux primaires beaucoup plus abondants que dans les phases $< 2\ \mu$: plagioclases avec la raie à 6,5 Å et d'autres raies comprises entre 4,02 et 3,18 Å, biotite : 3,34 Å (TF), augite : 3,24 ; 3,20 et 2,99 Å, enfin la hornblende : 8,42 Å dans le profil 4 où ce minéral est présent dans la roche-mère, contrairement au profil 3.

b) *Interprétation de ces résultats.*

Contrairement à la fraction $< 2\ \mu$ très uniforme, la composition de la phase 2-20 μ traduit l'existence de deux niveaux géochimiques différents dans le même profil.

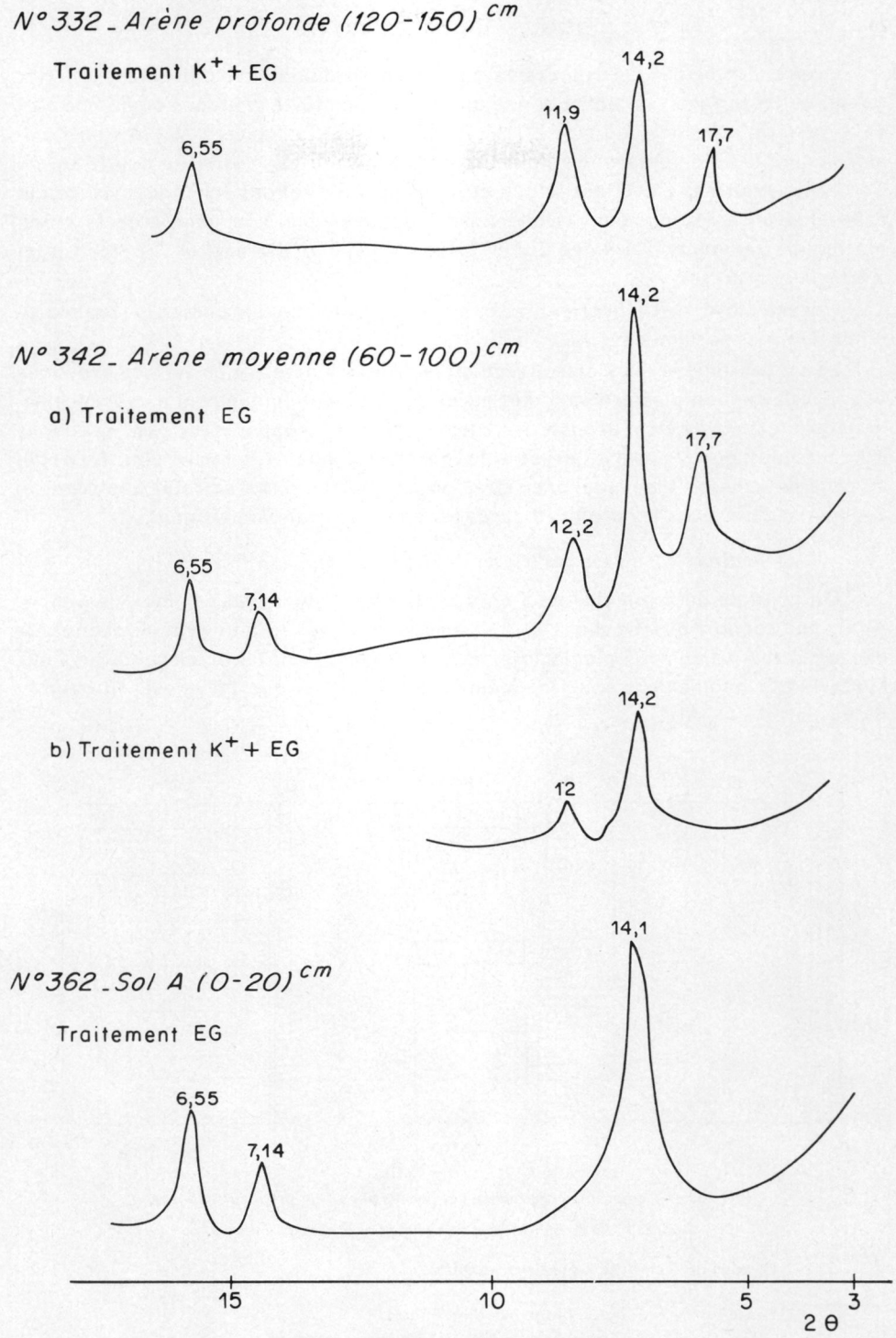


FIG. 4. — *Diagrammes des phases* 2-20 μ.
EG = éthylène-glycol, K^+ = saturation par KCl.
— *Diagrams of* 2-20 μ *phases.*

Le premier niveau est représenté par l'arène profonde où le drainage est plus ralenti qu'en surface : la biotite donne un interstratifié 10-14 Å et sans doute une part de la vermiculite proche du type 2/1 Al, tandis que les plagioclases évoluent en montmorillonite. Il est à remarquer d'ailleurs que ce niveau est plus riche que le sol en Ca et Mg, exprimés en cations totaux et sous forme de cations échangeables, ce qui détermine un environnement relativement plus favorable à la génèse de la montmorillonite (exemple : 5,4 me Ca et 1,4 me Mg/100 g d'arène et 1,8 me Ca et 0,4 Mg/100 g de sol).

L'arène moyenne contient les mêmes minéraux ; mais déjà la part de la montmorillonite diminue fortement.

Le sol constitue le deuxième niveau où le drainage accéléré en surface provoque une transformation plus profonde des micas qui évoluent uniquement en vermiculite, le stade interstratifié étant dépassé ; en même temps, il y a appauvrissement en cations échangeables, par rapport à l'arène et la montmorillonite ne se forme plus. A l'appui de cette hypothèse, il faut souligner que l'on ne constate pas d'entraînement vertical des phases fines dans les profils, d'après les analyses granulométriques.

c) *Analyses chimiques des phases* 2-20 μ (tabl. 4).

On constate de façon classique un accroissement important des taux de SiO_2 et Al_2O_3 par rapport aux fractions $< 2\ \mu$, en relation avec la plus grande abondance des minéraux primaires : plagioclases et ferromagnésiens ; les proportions de CaO, MgO, Na_2O augmentent pour les mêmes raisons, ainsi que la valeur du rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3.

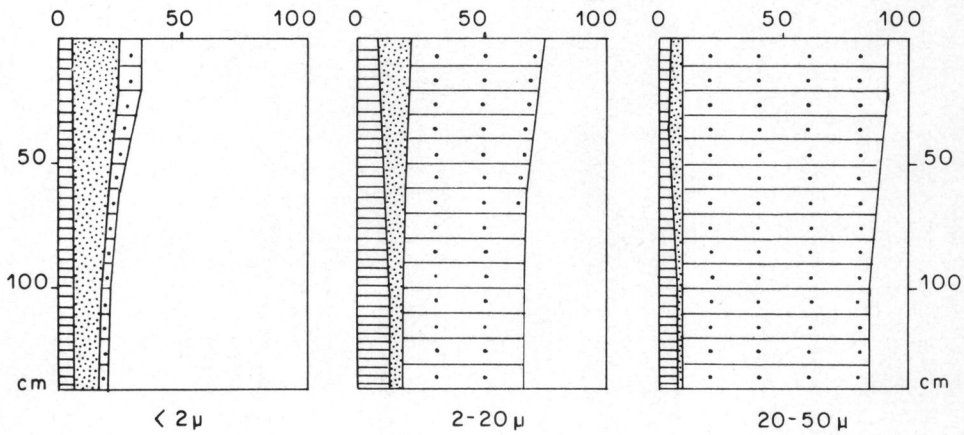


FIG. 5. — *Composition approchée des phases fines d'un profil sur gabbros.*
Approximate composition of fine phases of profile on gabbros.

Oxydes de fer libres. Free-iron-oxides.

Phase non cristalline. Noncrystalline phase.

Minéraux primaires non altérés. Unaltered primary minerals.

Minéraux argileux. Clay minerals.

2.3. *Phase* 50-125 μ.

Cette fraction, soumise sans aucun traitement préalable au test de l'éthylèneglycol révèle, tout comme les phases 2-20 μ, la présence d'une momtmorillonite, d'un interstratifié 10-14 Å et d'une vermiculite. Le mélange bromoforme-alcool a permis ensuite une séparation en deux fractions : l'une enrichie en plagioclases et l'autre en minéraux plus denses, biotite et augite. Dans la première, la présence de montmorillonite est très claire avec la raie à 17,7 Å et son origine dérivée des feldspaths est donc indiscutable. Mais les autres minéraux (interstratifiés et vermiculites) sont aussi présents, ce qui indiquerait qu'ils dérivent en partie de ces feldspaths (Ildefonse, 1978).

Il faut toutefois signaler que la part des minéraux secondaires dans cette fraction 50-125 μ est relativement réduite, comparativement à celle des minéraux primaires très largement dominants.

Ainsi, les minéraux secondaires ne sont-ils pas cantonnés dans la seule phase < 2 μ ; mais ils se rencontrent au contraire jusque dans les sables fins où ils s'associent aux minéraux primaires. Nous retrouvons ici les résultats déjà signalés en Guyane par Lelong (1967).

B. — *Essai de représentation graphique de la composition minéralogique des diverses phases fines d'un profil*

La figure 5 synthétise de façon graphique, la composition minéralogique approchée des fractions fines 0-50 μ dans l'ensemble d'un profil sur gabbros.

On constate la relative abondance des oxydes de fer libres issus des minéraux ferro-magnésiens surtout dans les phases < 2 μ et 2-20 μ ; la proportion des minéraux argileux secondaires est évidemment maximale dans la phase < 2 μ et diminue fortement dans les autres ; dans la phase 2-20 μ, elle ne représente plus que 20 à 30 p. 100 suivant les horizons du profil, tandis qu'elle s'abaisse aux environs de 10 p. 100 dans les sables très fins 20-50 μ ; corrélativement, la part des minéraux primaires s'accroît.

C. — *Analogies des caractéristiques physico-chimiques des phases fines issues des gabbros et des diorites*

Les caractéristiques physico-chimiques des phases fines contenues dans les zones d'altération et les sols sur gabbros dioritiques présentent de grandes analogies avec celles issues de l'altération des diorites (Dejou *et al.*, 1974). Les valeurs moyennes obtenues pour les capacités d'échange de cations sont élevées et pratiquement identiques, en ce qui concerne les fractions < 2 μ, à celles enregistrées pour les diorites du Massif Central : 51,3 et 53 me/100 g respectivement. Elles demeurent importantes pour les phases 2-20 μ (33 me/100 g) et même 20-50 μ (18 me/100 g), ce qui renforce encore la similitude de leurs propriétés avec celles des matériaux issus des diorites.

Les surfaces totales sont également élevées et la figure 6 montre qu'il existe une corrélation fortement positive entre leurs valeurs et celles des CEC, quelle que soit la taille des particules. Il est enfin remarquable de souligner que cette droite est très proche de celle tracée pour les diorites du Limousin (Dejou *et al.*, 1972).

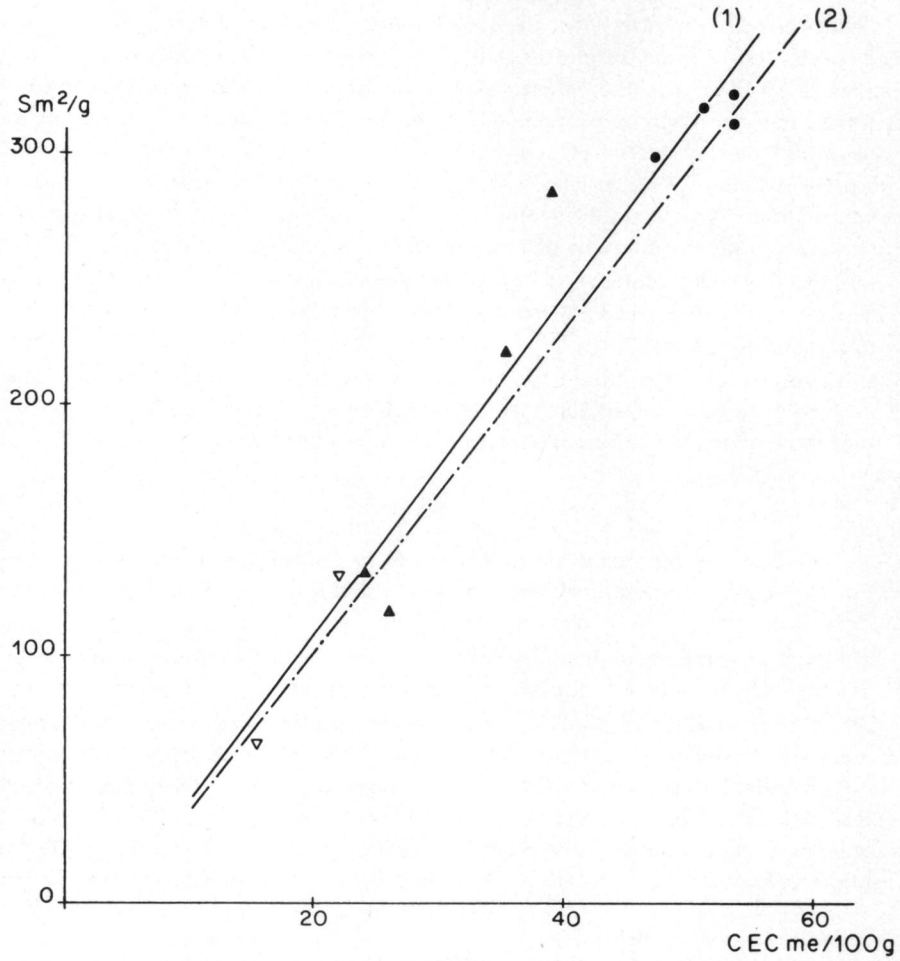


FIG. 6. — *Gabbros dioritiques du Cantal.*

Relations S/CEC.

Courbe (1) : $y = 6{,}6\,x - 21{,}6 \quad r = 0{,}968$.

La courbe (2) est celle obtenue pour les diorites du Limousin.

- ● Argile $< 2\,\mu$.
- ▲ Limon 2-20 μ.
- ▽ Phase 20-50 μ.

Dioritic gabbros from the Cantal.

Relationship S/CEC.

The curve (2) is that obtained for the dioritic-Limousin rocks.

- ● Clay $< 2\,\mu$.
- ▲ Silt 2-20 μ.
- ▽ Phase 20-50 μ.

VI. — Évolution chimique globale des gabbros dioritiques

Deux techniques ont été mises en œuvre pour appréhender cette évolution chimique.

1. — *Le raisonnement isovolumétrique*

Il faut souligner à ce propos que si la structure de la roche-mère est assez bien conservée dans les arènes, ce qui justifie l'emploi de cette méthode pour ces horizons, elle ne l'est plus dans les sols ; dès lors, les résultats doivent être accueillis ici avec réserve ; mais cette technique a été néanmoins utilisée pour donner une comparaison approchée des évolutions dans les deux niveaux géochimiques.

2. — *Le calcul de l'indice d'altération de Parker* (1970)

1. *Le raisonnement isovolumétrique.*

Le tableau 6 contient les analyses chimiques totales de deux profils complets depuis la roche-mère jusqu'au sol. A partir de ces données et des mesures de densité réelle, les calculs isovolumétriques ont été appliqués sur l'ensemble des horizons de ces deux profils et le tableau 7 synthétise les résultats obtenus en indiquant les pertes ou les gains subis par chacun des constituants essentiels au cours de l'altération.

On constate, tout comme les autres roches plutoniques (granites, diorites) et cristallophylliennes (micaschistes, anatexites) altérées dans les régions tempérées humides, une évolution géochimique globale relativement ménagée : les pertes totales, depuis la roche-mère jusqu'à l'arène s'établissent à 6,9 et 10 p. 100 respectivement pour les profils 3 et 4, tandis que celles depuis la roche jusqu'au sol s'élèvent à 10,4 et 13,0 p. 100. Ainsi, les deux niveaux géochimiques fondamentaux déjà différenciés par leur composition granulométrique et minéralogique, sans que l'on puisse relever une discontinuité quelconque dans les profils, se trouvent-ils aussi bien contrastés d'après les bilans d'altération chimique différents.

Si l'on examine désormais le devenir de chaque constituant chimique, on est conduit à définir deux groupes :

a) *Eléments dont les proportions augmentent au cours de l'altération.*

H_2O se place en tête de ces éléments et cette hydratation est toujours plus accusée dans le sol, en relation avec la genèse accélérée des minéraux argileux et des phases mal cristallisées ; elle délimite ainsi de façon typique le passage du stade de l'arénisation à celui de la pédogénèse.

Fe_2O_3 total ($Fe^{2+} + Fe^{3+}$) s'accroît également, surtout dans le sol et il est remarquable d'enregistrer la même progression dans les deux profils. Il s'agit en l'occurrence d'une augmentation relative. Par ailleurs Fe^{2+} s'oxyde en Fe^{3+} au fur et à mesure que l'on progresse depuis la base jusqu'au sommet des profils. En même temps, le fer libre s'accroît de façon régulière, traduisant ainsi une expulsion croissante de cet élément hors des réseaux ferro-magnésiens.

TABLEAU 6

Analyses chimiques des différents horizons sur gabbros dioritiques du Cantal
Chemical analysis of different horizons on dioritic gabbros from the Cantal

Profil n° 3

Constituants chimiques	N° 31 Roche fraîche	N° 32 Roche altérée	N° 33 Arène profonde (120-150) cm	N° 34 Arène moyenne (60-100) cm	N° 35 Sol (0-20) cm
H_2O^-	0,90	0,90	2,00	1,85	3,30
H_2O^+	2,00	2,35	4,20	4,10	6,20
SiO_2	52.50	53,50	53,00	52,70	50,15
Al_2O_3	17,20	18,20	18,50	18,30	18,32
Fe_2O_3	2.70	4,67	6,00	5,80	7,22
FeO	3,65	2,26	1,32	1,48	1,30
TiO_2	2,20	2,10	2,30	2,40	2,37
P_2O_5	0,55	0,53	0,50	0,50	0,44
MnO	0,17	0,15	0,20	0,17	0,19
CaO	6,50	5,20	3,30	3,65	2,53
MgO	2,95	2,45	2,10	2,25	1,78
K_2O	3,20	2,80	3,10	2,90	2,48
Na_2O	4,35	4,80	4,40	4,20	3,23
Total	98,85	99,91	100,12	100,30	99,49
p. 100 Fe_2O_3 libre	0,98	1,32	1,63	1,72	2,45

Profil n° 4

Constituants chimiques	N° 41 Roche fraîche	N° 42 Roche altérée en boule	N° 43 Arène (100-150) cm	N° 44 Sol (0-20) cm
H_2O^-	0,50	0,85	2,40	4,05
H_2O^+	2,50	2,50	4,00	4,55
SiO_2	49,50	52,50	51,10	49,85
Al_2O_3	17,50	17,60	18,00	17,70
Fe_2O_3	1,90	6,46	7,67	7,63
FeO	4,76	1,21	1,35	1,53
TiO_2	2,50	2,70	3,10	2,84
P_2O_5	0,80	0,60	0,55	0,42
MnO	0,19	0,16	0,10	0,20
CaO	8,10	5,90	3,15	2,90
MgO	3,45	2,75	2,40	1,93
K_2O	3,30	2,00	2,45	1,87
Na_2O	4,10	4,00	3,75	2,95
Total	99,10	99,23	100,02	98,42
p. 100 Fe_2O_3 libre.	0,67	0,87	1,57	2,18

Analystes : J. Rouiller et B. Souchier (Nancy, 1975).

TABLEAU 7

Résultats des calculs isovolumétriques

Results of isovolumetric calculations

Constituants chimiques principaux	Pertes et gains en p. 100 de chaque constituant			
	Profil 3		Profil 4	
	Depuis le gabbro frais de l'arène moyenne	Depuis le gabbro frais au sol	Depuis le gabbro frais à l'arène	Depuis le gabbro frais au sol
H_2O	+ 188,7	+ 292,3	+ 197,4	+ 258,2
SiO_2	— 7,6	— 14,8	— 7,7	— 11,8
Al_2O_3	— 2,1	— 5,0	— 8,0	— 11,4
Fe_2O_3 total	+ 1,3	+ 11,4	+ 11,3	+ 11,3
TiO_2	0	— 3,8	+ 11,0	0
MnO		0		— 9,2
CaO	— 48,3	— 65,2	— 65,2	— 68,7
MgO	— 29,8	— 46,1	— 37,8	— 51,1
K_2O	— 16,5	— 30,8	— 33,6	— 50,0
Na_2O	— 11,1	— 33,7	— 18,2	— 37,0
Pertes globales en p. 100 : de la roche mère à l'arène :		6,9	10,0	
de la roche au sol :		10,4	13,3	

TiO_2 peut être rangé aussi dans le premier groupe, soit qu'il entre dans la constitution de minéraux non silicatés (ilménite) ou silicatés (augite et sphène).

Enfin MnO demeure presque constant au cours de l'évolution chimique.

b) *Eléments dont les proportions diminuent au cours de l'altération.*

On peut les classer en deux sous-groupes :

Eléments caractérisés par des pertes relativement faibles. Il s'agit de SiO_2 et Al_2O_3. La désilicification et la désalumination demeurent discrètes en cours de cette évolution naissante, et sensiblement du même ordre d'intensité, ce qui justifie le choix possible de ces éléments comme invariants dans les bilans d'altération.

Eléments caractérisés par des pertes plus accusées. En les rangeant suivant une intensité croissante, on trouve d'abord Na^+, évacué moins facilement que Mg^{++} et Ca^{++} (et même K^+ pour le profil 4). La même constatation avait été formulée à propos des diorites du Limousin et par Ildefonse (1978) pour les gabbros du Pallet.

Vient ensuite K^+ dont la mobilité est très variable : 30,8 et 50 p. 100 évacués, exprimés en K_2O ; les deux gabbros contenant au départ la même quantité de feldspaths potassiques (10 p. 100) qui d'ordinaire se révèlent rebelles à l'altération chimique sous nos climats et aussi, le même pourcentage en biotite (18 p. 100), on peut penser qu'une sensibilité différente du mica, peut-être liée à un état pétrographique différent dans deux situations pourtant très proches, est susceptible de rendre compte de ces deux types d'évolution.

Mg^{++} est également très mobile, mais les pertes les plus fortes sont enregistrées pour Ca^{++}, aussi bien dans les arènes que dans les sols, tout comme les gabbros du

Pallet ; ceci traduit l'intense altération des plagioclases calciques et dans une proportion probablement moindre de l'augite, que ce soit dans le profil 3 où, en l'absence de hornblende, tout le Ca^{++} se concentre dans ces deux minéraux ou dans le profil 4 où la hornblende est présente, mais se révèle plus difficilement vulnérable que les feldspaths et les pyroxènes.

Etablissement de séquences d'altération. Les calculs isovolumétriques permettent d'établir les séquences d'altération suivantes, où les éléments chimiques sont classés par ordre de mobilité croissante :

1er *profil.* $Fe_2O_3 < MnO, TiO_2 < Al_2O_3 < SiO_2 < K_2O \leqslant Na_2O < MgO < CaO.$

2e *profil.* $Fe_2O_3 < TiO_2 < MnO < Al_2O_3 < SiO_2 < Na_2O < K_2O < MgO < CaO.$

Ces relations traduisent une dynamique comparable à celles des diorites du Limousin, à l'exception toutefois de la position de Na_2O qui précède ici CaO.

La différence de composition minéralogique entre les diorites et les gabbros dioritiques peut rendre compte de ce fait. Dans les diorites où l'augite est absente, la présence d'une haute teneur en hornblende peu vulnérable détermine pour CaO une place qui se situe d'ordinaire avant Na_2O dans les séquences d'altération. Au contraire sur gabbros, dans le premier profil, CaO se répartit uniquement entre l'andésine-labrador (50 p. 100) vulnérable et l'augite (12 p. 100). Dans le 2e cas, CaO est engagé dans le feldspath (35 p. 100), l'augite (13 p. 100) et la hornblende (10 p. 100) et la proportion de ce minéral peu vulnérable n'est pas suffisante pour modifier la position respective des deux cations.

2. *Indice d'altération de A. Parker* (1970).

La méthode de A. Parker peut fournir une deuxième approche de l'évolution chimique des gabbros. Elle propose en effet d'estimer l'altération géochimique des roches silicatées par le calcul d'un indice défini comme suit :

$$Ia = \left[\frac{Ca}{0,7} + \frac{Mg}{0,9} + \frac{K}{0,25} + \frac{Na}{0,35}\right] \times 100.$$

L'auteur retient dans sa formule uniquement les cations qu'il considère à juste titre comme les plus mobiles car ils traduisent au mieux, selon lui, l'évolution superficielle d'un matériau silicaté. Leurs quantités sont calculées en nombre d'atomes totaux dans le matériau constituant les horizons d'un profil, depuis la roche-mère jusqu'au sol. Aux dénominateurs figurent les énergies de liaison de ces cations avec l'oxygène estimées par Nicholls (1963).

La figure 7 représente les variations de cet indice de Parker pour chacun des deux profils sur gabbros du Cantal (courbes 1 et 2). Ces résultats sont comparés en même temps avec ceux obtenus pour les diorites du Limousin (courbes 3 et 4) dont l'altération est plus ancienne, présumée du début Quaternaire et sans doute plus antérieure encore.

Il en résulte que si cette altération naissante post-würmienne des gabbros du Cantal se caractérise par une faible épaisseur des arènes et seulement un stade vermiculitique prédominant pour ce qui concerne l'évolution des minéraux argileux secondaires, elle s'avère au point de vue chimique global presque aussi intense que les altérations poursuivies depuis tout le Quaternaire sur les diorites, les valeurs des

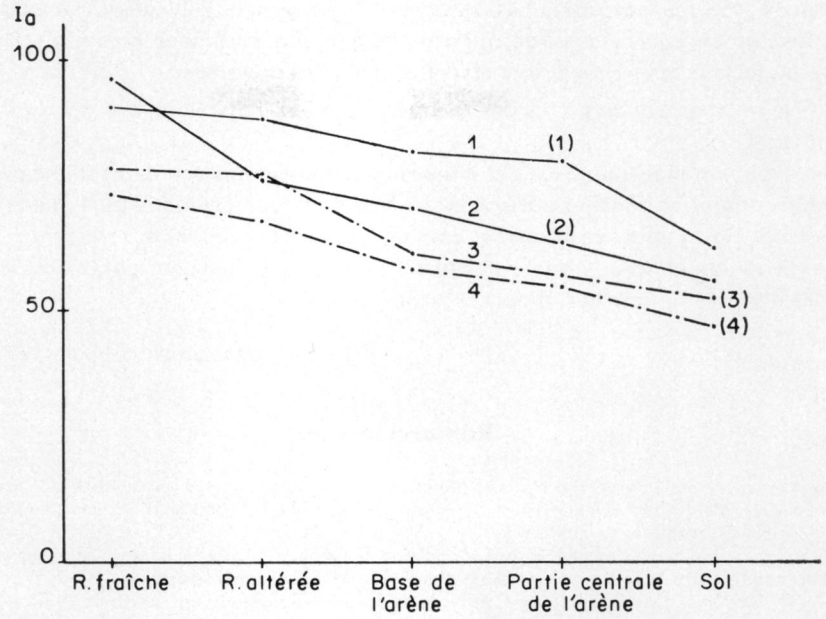


FIG. 7. — *Variations de l'indice d'altération de A. Parker* (1970) *dans les divers horizons d'un profil.*
Variations of the weathering index after A. Parker (1970) *on the different horizons of the profile.*

1-2. — Gabbros dioritiques du Cantal. Altération récente, post-würmienne.
1-2. — Dioritic-gabbros from the Cantal : a recently formed after würm weathering.
3-4. — Diorites du Limousin. Altération ancienne, présumée quaternaire.
3-4. — Diorites from the Limousin : an old weathering, presumed quaternary.

indices obtenus pour les sols étant relativement proches. C'est dire l'importance des hydrolyses dans ce secteur, où certes la température moyenne est faible : 6 °C, mais où les précipitations atteignent une moyenne annuelle de 2 130 mm pour 25 années d'observations (1951-1975) à la Station de Mandailles située à 5 km en aval du gisement étudié, à 940 m d'altitude ; il est d'ailleurs probable que cette pluviosité est supérieure dans la zone des gabbros, localisée à une altitude avoisinant 1 050-1 100 m.

Conclusion générale

Dans les régions tempérées humides à forte pluviosité, supérieure à 2 000 mm par an, l'évolution superficielle des gabbros dioritiques est relativement rapide.

Tel est le cas de celle qui vient d'être décrite dans le Cantal et qui peut être considérée comme encore naissante puisqu'elle n'a débuté que postérieurement à la glaciation würmienne. Elle a donné naissance à une arène et à un sol d'une profondeur maximale de 1,50 m et cette évolution se caractérise par un ameublissement (mesuré par le pourcentage d'éléments fins 0-20 μ) aussi important que celui que l'on rencontre dans des arènes plus anciennes développées sur diorites du Limousin pendant tout le Quaternaire et par une altération chimique comparable en intensité.

Mais à côté de ces analogies entre ces deux types d'altération naissantes et anciennes, on enregistre aussi des différences que l'on est amené à rapporter à l'influence du facteur temps et qui sont essentiellement les suivantes :

— volume global des altérites, beaucoup moins important sur les évolutions naissantes,

— évolution moins poussée des minéraux primaires qui donnent comme produits secondaires dans les altérites naissantes, un peu de montmorillonite puis surtout de la vermiculite, mais jamais de kaolinite, comme c'est le cas dans les diorites,

— évolution chimique totale des altérites naissantes un peu moins accusée que celle des altérites sur diorites, d'après l'indice de Parker.

Reçu pour publication en mars 1979.

Remerciements

Nous tenons à exprimer ici nos plus vifs remerciements à ceux qui nous ont apporté leur précieuse collaboration : MM. Robert et Hervio du Laboratoire des Sols I.N.R.A. de Versailles qui ont bien voulu se charger des diagrammes de rayons X,

Mmes F. Cantagrel et S. Couturie du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, qui ont procédé aux analyses chimiques totales des fractions fines,

MM. B. Souchier et J. Rouiller du Centre de Pédologie Biologique du CNRS de Nancy qui ont analysé les divers échantillons de gabbros dioritiques,

enfin Mme Monique Jacquin, de la Station de Science du Sol, I.N.R.A. de Dijon, qui a effectué les extractions et les déterminations analytiques des constituants de la phase amorphe.

Summary

An example of a beginning weathering on basic rocks in humid temperate region. case of dioritic gabbros of the jordanne high valley (Cantal)

An example of a beginning weathering occurred subsequently to the Würmian glaciation was studied on dioritic gabbros of the Jordanne high valley (Cantal).

These rocks produced sandy soils and mesotrophic brown soils which present a total thickness of 1 m 50 at the maximum. The sandy soils are poor in fine parts : 2 to 3 p. 100 clay $< 2\ \mu$ and 4 to 6 p. 100 (2-20 μ) ; in the soils on the contrary these two phases grow very markedly.

The secondary products resulting from the evolution of these rocks can be divided into several granulometric classes and are formed by two types of materials : an amorphous phasis and crystallized clay minerals among which vermiculite predominates very widely.

The global chemical evolution is only more gradual than those of old alterations described in the same geographical groups and developed during the whole quaternary era. The latter differ from the very recent alterations through a much more important global volume of alterites a much more elaborate evolution of the secondary minerals expressed in particular by the presence of kaolinite and by a little more active total chemical evolution estimated according to Parker's alteration index.

Zusammenfassung

Beispiel einer anfangenden Verwitterung auf basischen Gesteinen in der gemässigten feuchten Klimazone. Zustand der Gabbrodioriten des jordanner Obertales (Cantal)

Ein Beispiel einer anfangenden, später als die Würmische Vergletscherung entstandenen Verwitterung ist auf Gabbrodioriten des Jordanner Obertales (Cantal) untersucht worden.

Diese Gesteine haben sich in Sandböden und mesotrophen Braunerden entwickelt, deren gesamte Dicke höchstens 1 m 50 beträgt. Die Sandböden sind arm an Feinanteilen : 2 zu 3 % Ton $< 2\ \mu$ und 4 zu 6 % Lehm (2-20 μ) ; in den Böden hingegen nehmen diese zwei Phasen sehr deutlich zu.

Die Nebenprodukte der Entwicklung dieser Gesteine verteilen sich in mehreren granulometrischen Bodenteilen und bestehen aus zwei Klassen von Materialien : eine gestaltlose Phase und erstarrte Tonmineralien, unter denen das Vermiculite sehr weitgehend vorherrschend ist.

Die chemische Gesamtentwicklung ist nur mässiger als die der früheren Verwitterungen, die in denselben geographischen Komplexen beschrieben worden sind und während der gesamten quaternären Zeiten vorgekommen sind. Die letzten weichen von den sehr neuen Verwitterungen durch ein viel wichtigeres Gesamtvolumen von Alteriten, eine hochgradigere Entwicklung der Nebenmineralien ab, die sich insbesondere durch die Anwesenheit von Kaolinit und eine etwas wirksamere nach dem Verwitterungsindex von Parker geschätzte chemische Gesamtentwicklung ausdrückt.

РЕЗЮМЕ

Пример начального поверхностного выветривания основных пород в умеренно влажных районах. Диоритические габбросы горной долины жорданны (канталь).

Дежу Ж., Гюийо Ж., Трише Ж

На диоритических габбросах горной долины речки Жорданны (деп. Канталь) изучался пример начальной поверхностной эволюции, развившейся после ледников Вюрма. Породы эти дали начало песчанным площадям и коричневым мезотрофным почвам с максимальным слоем в 1,50 м. В песчанных площадях мало мелких фракций : 2 — 3 % глины × 2 μ и от 4 до 6 % суглинка ; в почвах, напротив, набдюдается сильное увеличение этих двух фаз.

Вторичные продукты эволюции этих пород распределяются между несколькими гранулометрическими фракциями, и состоят они из материала двух категорий : аморфной фазы и кристаллизированных глинистых минералов, среди которых широко преобладает вермикулит.

Общая химическая эволюция протекает только более медленным темпом, чем эволюция древних выветриваний, описанных в тех-же географических системах и развивавшихся в течении всех четвертичных эпох в целом. Эти древние выветривания отличаются от самых недавних общим, гораздо более крупным об'емом альтеритов, и более законченной эволюцией вторичных минералов, выражающейся, в частности, присутствием каолинита и немного более активной общей химической эволюцией, оценивавшейся по показателям выветривания Паркера.

Références bibliographiques

BASHAM I. R., 1974. Mineralogical changes associated with deep weathering of gabbro in Aberdeenshire. *Clays minerals*, **10,** 189-202.

BOISSE DE BLACK Y., 1939. Observations nouvelles sur l'Ouest du Cantal. *Bull. Carte Géol. France* nº 20, **41,** 1-60.

BROUSSE R., THIÉBAULT F., 1968. *Des calculs pétrochimiques*, Gauthier-Villars, Mises à jour, **3,** 369-394.

CHESWORTH W., 1976. Communications orales.

CHEVALIER Y., 1970. Sur l'altération des diorites quartziques de la région de Claviers (Var.). Comparaison de quelques résultats avec ceux acquis sur les diorites du Limousin. *C. R. Ac. Sc.*, **271,** Série D, 2217-2220.

CHEVALIER Y. 1971*a*. Pédogenèse récente sur diorite quartzique riche en biotite dans le Tanneron occidental. Comparaison des résultats avec ceux acquis sur un faciès relictuel. *C. R. Ac. Sc.*, **273,** Série D, 30-33.

CHEVALIER Y. 1971*b*. A propos de l'altération pédogénétique des diorites quartziques dans le Tanneron occidental (Provence cristalline). *C. R. Somm. Soc. géol. France*, **3,** 177-179.

DEJOU J., GUYOT J., CHAUMONT Colette 1972. Altération superficielle des diorites dans les régions tempérées humides. Exemples choisis dans le Limousin. *Sci. Geol. Bull. Strasbourg*, **25** (4), 259-286.

DEJOU J., GUYOT J., ROBERT M., 1974. Différenciation observée au cours de l'évolution géochimique superficielle entre les roches acides (granites, micaschistes) et les roches basiques (diorites) dans les régions tempérées humides. *C. R. Acad. Sci.*, **279,** Série D, 3, 223-226.

DEJOU J., GUYOT J., TRICHET J., 1976. Présence d'une phase amorphe relativement importante dans le complexe d'altération issu de l'évolution superficielle de gabbros dioritiques en région tempérée humide. Analogies et différences avec celle contenue dans les andosols de ces mêmes régions, *C. R. Acad. Sci.*, **282,** Série D, **17,** 1577-1580.

FIELDES M., PERROT R. W., 1966. The nature of allophane in soils-3-Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zeal. J. Sc.*, **9,** 629-632.

FOLLETT E. A. C., McHARDY W. J., MITCHELL B. D., SMITH B. L. F., 1965. Chemical dissolution techniques in the study of soil clays. Part II. *Clay minerals*, **6,** 35-43.

GAC J. Y., 1968. *Les altérations de quelques roches cristallines des Vosges. Etude minéralogique et géochimique*. Thèse Fac. Sc. Univ. Strasbourg, 77 p.

GODARD A., 1977. *Pays et paysages du granite*. P. U. F. Coll. Le Géographe nº 21, 232 p.

GOLDICH S. S., 1938. A study of rock weathering. *Journ. Geol.*, **46,** 17-58.

HÉTIER J. M., 1973. Caractères et répartition des sols volcaniques du Massif Central. *Sc. du Sol., Bull. AFES*, **2,** 97-114.

HÉTIER J. M., 1975. *Formation et évolution des andosols en climat tempéré*. Thèse Fac. Sc. Nancy, 194 p., XXIII p. annexes + 14 p. bibliogr.

ILDEFONSE Ph., 1978. *Mécanismes de l'altération d'une roche gabbroïque du Massif du Pallet* (Loire-Atlantique). Thèse Doct. Spec. Univ. Poitiers, 142 p.

JUNG J., BROUSSE R., 1962. Les provinces volcaniques néogènes et quaternaires de la France. *Bull. Serv. Carte Géol. France* nº 267, t. LVIII.

de KIMPE C., CLÉMENT P. et DEJOU J., 1978. Travaux en cours sur l'évolution géochimique superficielle des gabbros du Mont Mégantic (province de Québec) (Canada).

KITAGAWA Y., 1973. The infrared absorption band of allophane near 1 650 cm^{-1}. *Soil Sc. Plant Nutrit.*, **20** (2), 195-196.

KITAGAWA Y., 1973. Substitution of aluminium by iron in allophane. *Clay Science*, **4,** 151-154.

KITAGAWA Y., 1974. Dehydration of allophane and its structural formula. *Americ. Mineralogist*, **59,** 1094-1098.

LACROIX A., 1909. Sur l'existence de roches grenues intrusives pliocènes dans le massif volcanique du Cantal. *C. R. Acad. Sci.*, **149,** 541-546.

LELONG F., 1967. *Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide* (*Guyane française*). Thèse Univ. Nancy, Sc. de la Terre. 188 p.

MAISONNEUVE J., 1960. Etude géologique sur le sud de la Corse, région comprise entre Ajaccio et Porto-Vecchio. *Bull. Serv. Carte Géol. France* nº 260, LVII, 236 p.

MÉRIAUX Suzanne, 1962. Quelques applications des méthodes statistiques à la caractérisation des sédiments et des sols. *Bull. Groupe Franç. Argiles* nº 13, nouv. série nº 8, 19-25.

MOINEREAU J., 1975. Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns. Séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France). 3e partie. Nature et évolution de la fraction argileuse. *Sc. du sol, Bull. AFES* (4), 295-314.

MOINEREAU J., 1977. *Altération des roches, formation et évolution des sols sur basalte, sous climat tempéré humide* (Velay, Vivarais, Coirons). Thèse Univ. Sc. et Tech. Languedoc, Montpellier, 139 p. + ann.

NADEAU J. C., 1961. Evaluation de la proportion et de la nature des réseaux expansibles dans un mélange d'argiles. *C. R. Acad. Sci.*, **253** (1), 162-164.

NGUYEN KHA, 1973. *Recherches sur l'évolution des sols à texture argileuse en conditions tempérées et tropicales*. Thèse Univ. Nancy, 157 p. + bibliogr.

NICHOLLS G. D., 1963. Environmental studies in sedimentary geochemistry. *Sci. Prog. Lond.*, **51,** 12-31.

PARKER A., 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Magaz.*, 501-504.

ROBERT M., 1975. Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. *Ann. agron.*, **26** (4), 363-399.

ROSS C. S., KERR P. F., 1934. Halloysite and allophane. *U. S. Geol. Survey*. Prof. Paper 185 G.

SEDDOH F. K., PÉDRO G., ROBERT M., DEJOU J., 1969. Sur l'évolution des biotites en intergrades à 14 Å dans les arènes granitiques de Tazilly (massif de Luzy, Morvan méridional). *C. R. Acad. Sci.*, **268,** Série D, nº 15, 1901-1904.

SNETSINGER K. G. (1967). High aluminia allophane as a weathering product of plagioclases. *Amer. Mineralogist*, **52,** 254-262.

TARDY Y., 1969. *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Thèse Fac. Sc. Strasbourg et Mem. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine nº 31, 199 p.

TRICHET J., 1970. *Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques*. Thèse Fac. Sc. Paris. Trav. Labo geol. E. N. S. Paris, 152 p. + VII pl. h. t.

VATIN-PÉRIGNON Nicole, 1966. *Pétrographie et minéralogie des roches volcaniques et description géologique de la partie centrale du Massif Central*. Thèse Fac. Sc. Univ., Grenoble, 359 p.

YAMADA I. et SHOJI S., 1975. Soils formed from the andesitic and basaltic volcanic ashes. II. Soil properties and fertility problems. *Tohoku. Agric. Res.*, **26** (3-4), 102-116.

YOSHINAGA N., AOMINE S., 1962. Allophane in some andosols. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **8** (2), 6-13.

YOSHINAGA N., 1966. Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from andosols and weathered pumices. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **12** (2), 47-54.

Ann. agron., 1979, **30** (1), 89-103.

Utilisation de l'azote des fumures par les sorghos fourragers

J. DECAU * et J.-R. MARTY *

avec la collaboration technique de M. DABASSE *, A. HILAIRE ** et A. PACE *

* *Station d'Agronomie*
Centre de Recherches de Toulouse I.N.R.A., BP. n° 12,
31320 *Castanet Tolosan*

** *Chambre Départementale d'Agriculture de la Haute-Garonne S.U.A.D., 61, allée de Brienne*
31000 *Toulouse*

Résumé

Différents aspects de la production de sorghos fourragers (un Sorghum Sudense Stapf., variété Piper, et un hybride Sorghum bicolor L. Moench × Sorghum Sudense Stapf., variété Grazer) en relation avec l'utilisation de l'azote par les cultures ont été étudiés : les rythmes des cycles de production, les quantités d'azote absorbé, les effets de la fumure, l'utilisation de l'azote dans la production végétale et la qualité des produits (teneur en azote total, présence d'azote nitrique) ont été tour à tour envisagés en fonction :

— de la fumure azotée apportée,
— du type végétal,
— du mode d'exploitation (pâture ou coupe ensilage),
— du climat de l'année.

Les résultats montrent la variabilité de la durée et du nombre des cycles d'exploitation selon le type de sorgho et l'année de culture : de 2 cycles (pâture + coupe ensilage) chez Grazer en année froide à 6 cycles pâtures chez Piper en année normale ; les quantités d'azote absorbées au cours du cycle diffèrent selon le type de sorgho et son mode d'exploitation : 60 et 100 kg N/ha chez Piper en moyenne, 80 et 110 kg N/ha chez Grazer, aux stades pâture et coupe ensilage respectivement, mais elles sont très variables et indépendantes de la fumure azotée apportée. Pour l'ensemble des cycles d'une année de culture, la production végétale totale dépend à la fois du type de sorgho (elle est supérieure chez Grazer), de son mode d'exploitation (plus élevée dans les cycles avec coupe ensilage) et de la fertilisation. La fumure pratiquée, calculée avec l'objectif d'apporter la quantité d'élément nécessaire pour obtenir une production renfermant 2 p. 100 d'azote, conduit à produire du matériel végétal renfermant généralement plus de 2 p. 100 d'azote et atteignant même 3 p. 100 (cas de certaines pâtures de Piper) ; les exploitations de Grazer en coupe ensilage, cependant, présentent des teneurs inférieures au taux visé.

Une part de l'azote absorbé est demeurée dans le végétal sous forme de nitrates ; les teneurs sont généralement plus élevées au stade pâture qu'au stade coupe ensilage, chez Grazer que chez Piper ; elles diffèrent largement selon les conditions climatiques ; en année froide, on observe une plus grande accumulation de nitrates.

Les résultats montrent en définitive que les deux types de sorghos présentent une aptitude très différente à utiliser l'azote.

Les agriculteurs auront à choisir entre un type produisant (à l'épiaison) beaucoup de matière végétale (et d'énergie disponible pour l'animal) mais relativement pauvre en azote (cas d'un hybride Sorgho × Sudan tel que Grazer) ou un type moins productif (cas d'un Sudan-grass tel Piper) mais assurant une meilleure utilisation de l'azote et renfermant ainsi davantage de protéines.

Introduction

Dans le Sud-Ouest de la France, les conditions climatiques estivales sont souvent peu favorables à la production fourragère. Les graminées d'origine tempérée (ray-grass, fétuque...) fournissent des productions faibles, même en présence d'irrigation, et valorisent très mal l'eau apportée (Marty et Puech, 1971). Il en est de même, quoique dans une moindre mesure, pour les variétés classiques de luzerne.

Au contraire, les graminées d'origine tropicale, et en particulier les sorghos fourragers, fournissent une pousse estivale satisfaisante, surtout en conditions irriguées. L'efficience de l'eau consommée par les cultures est alors très supérieure, durant cette période, à celle des graminées de type ray-grass ou fétuque (Marty et Puech, 1971).

Mais les productions de sorgho fourrager présentent souvent une valeur nutritionnelle plus faible que celle des autres fourrages (Demarquilly et Weiss, 1970) ; ceci peut provenir (entre autres causes) de la présence de glucosides cyanogènes dans les tissus (Hugues, 1968) ou de la faible teneur en azote des récoltes, elle-même liée aux conditions de fertilisation.

Nous nous sommes intéressés à ce dernier problème et avons recherché, au cours d'années culturales successives, l'aptitude de sorghos fourragers de type différent, adaptés au climat du Sud-Ouest de la France, un Sudan-grass (Sorghum Sudense Stapf., variété Piper) et un hybride Sorgho × Sudan (Sorghum bicolor L. Mœnch × Sorghum Sudense Stapf., variété Grazer), à utiliser l'azote des fumures, en conditions sèches ou irriguées et selon que la production est destinée à l'ensilage ou à la pâture.

Nous indiquerons seulement ici les résultats de deux années typiquement différentes par leurs conditions climatiques, 1972 et 1973 ; Nous considérerons les réponses des deux sorghos à la fumure dans leur absorption d'azote et leur synthèse totale de matière ; nous étudierons ensuite les relations entre les deux phénomènes et leurs conséquences sur la teneur en azote des fourrages et sur l'utilisation métabolique de cet élément ; la présence de N non métabolisé, particulièrement de nitrates, sera ainsi recherchée.

Conditions expérimentales

Les deux sorghos (Sudan-grass et hybride Sorgho-Sudan) ont été cultivés sur le dispositif expérimental de longue durée de la Station d'Agronomie de Toulouse, à Auzeville, en sol brun alluvial profond, de texture argilo-limoneuse, légèrement calcaire. Ils ont été semés aux densités respectives de 3 000 000 et 750 000 grains/ha (apport de 35 et 25 kg de semence). Le nombre de tiges/ha a été en moyenne de 2 200 000 chez le Sudan-grass, de 800 000 chez l'hybride.

Les conditions climatiques, durant les deux années d'expérimentation dont les résultats sont relatés ci-après, ont été marquées par des différences hélio-thermiques très importantes (tabl. 1).

TABLEAU 1

Conditions héliothermiques mensuelles moyennes durant les cultures de sorghos fourragers

Monthly heliothermic mean conditions during the different growing periods of fodder sorghums

	1972			1973		
	Températures moyennes (°C)	Nombre d'heures d'insolation	E.T.P. (mm)	Températures moyennes (°C)	Nombre d'heures d'insolation	E.T.P. (mm)
Juin	16,1	205	117,4	18,7	260	142,1
Juillet	20,5	294	155,5	20,6	249	142,9
Août	19,0	220	143,1	22,9	221	141,2
Septembre..	15,4	176	82,0	19,1	211	123,0
Octobre ...	—	—	—	12,1	193	63,9

TABLEAU 2

Conditions de culture et d'exploitation des sorghos

Cropping and harvesting conditions for the 2 sorghums

Année	Alimentation hydrique (1)	Type de sorgho	Nature des exploitations successives (2), fumures appliquées (N kg/ha) et intervalle de temps entre deux exploitations (j)
1972	NI-I	Piper	P (60-120) (21 j) E (100) (27 j) P (100) (44 j) (3) (5) (6) E (100) (56 j)
	NI-I	—	E (60 ou 120) (35 j) P (100) (27 j) P (35 ou 50) (38 j) (3) E (35 ou 50) (53 j) (4)
	NI-I	Grazer	P (60 ou 120) (35 j) E (100) (48 j) (3)
	NI-I	—	E (60 ou 120) (62 j) P (140 ou 160) (58 j) (3) (4)
1973	NI	Piper	P (100) (22 j) P (50) (19 j) P (30) (22 j) P (50) (20 j) P (0) (26 j) P (0) (31 j)
—	I	—	P (100) (22 j) P (50) (19 j) P (50) (22 j) P (50) (20 j) P (50) (26 j)
—	NI	—	E (100) (39 j) E (150) (30 j) E (50) (28 j)
—	I	—	E (150) (39 j) E (150) (30 j) E (70) (40 j)
—	NI	Grazer	P (100) (33 j) P (50) (23 j) P (60) (27 j) P (50) (35 j)
—	I	—	P (100) (29 j) P (100) (20 j) P (100) (29 j) P (70) (31 j)
—	NI	—	E (150) (61 j) E (100) (48 j)
—	I	—	E (150) (56 j) E (150) (53 j)

(1) Cultures non irriguées (NI) ou irriguées (I).
(2) Exploitation au stade pâture (P) ou épiaison (E).
(3) Fumures apportées après luzerne (60) ou après soja (120), respectivement.
(4) Fumures apportées en conditions non irriguées (35, 140) ou avec irrigation (50, 160).
(5) Nombre de jours de la levée à la première exploitation.
(6) Nombre de jours entre deux cycles.

Nous nous sommes efforcés d'apporter aux cultures une fertilisation azotée suffisante, non limitante pour la synthèse de matière végétale et permettant d'obtenir des récoltes bien pourvues en azote protéique, aussi proches que possible de celles que fournissent les graminées tempérées. Pour cela, un premier apport de fertilisation a été réalisé en mai, avant semis, assurant une avance à la culture, variable selon le précédent cultural (luzerne ou soja pour l'essai 1972) ou selon le type d'exploitation prévu, coupe ensilage ou pâture (essai 1973) ; des apports ultérieurs, calculés en fonction des espérances de production ont été réalisés après chaque coupe (tabl. 2).

Les deux sorghos ont été exploités, en 1972, alternativement en pâture (en fait coupe lorsque la plante a atteint 40-50 cm, chez Piper, ou 70-80 cm, chez Grazer) ou en ensilage (coupe en début d'épiaison), en 1973 uniquement selon l'un de ces deux modes d'utilisation (tabl. 2). La hauteur des plantes, lors de leur exploitation en pâture est celle qui est habituellement adoptée par la pratique agricole ; elle a été choisie chez l'un et l'autre types en raison de l'évolution des teneurs en glucosides cyanogènes avec l'âge physiologique (Hugues, 1969 ; Ferret, 1977) : il apparaît en effet une diminution importante de la teneur des plantes en acide cyanhydrique (et donc du risque de toxicité pour l'animal) lorsque celles-ci atteignent les hauteurs moyennes indiquées.

Par ailleurs, lors d'une étude préliminaire de la croissance des deux sorghos, nous avons observé qu'au moment de leur exploitation en pâture, les deux plantes sont l'une et l'autre dans une phase très active de montaison.

Enfin, les masses de matière végétale élaborées entre chaque coupe ont été mesurées, on a déterminé sur ces matériels les teneurs en azote total et en nitrates correspondantes ; les exportations d'azote lors de chaque exploitation et pour l'ensemble des cycles ont été calculées et comparées aux apports ; les relations observées entre les grandeurs calculées ou mesurées ont été étudiées et l'analyse statistique des données réalisée (cf. tabl. 4, p. 99).

Résultats

1. — *Nombre et durée d'exploitations*

Le nombre de cycles, coupe ensilage ou pâture, a varié de 2 à 6 selon le type de sorgho, le stade physiologique de récolte et l'année de culture (tabl. 2). Nous voyons ainsi en particulier que le Sudan-grass (Piper) permet un nombre plus grand d'exploitations que l'hybride Sorgho × Sudan (Grazer), chaque cycle étant de durée plus courte chez le premier. La durée totale de la période de pousse exploitable a également varié de 81 jours chez Grazer récolté en pâture puis coupe ensilage en 1972, à 140 jours chez Piper exploité en pâture en 1973. L'inévitable discontinuité des exploitations, qui nécessitent que le végétal ait atteint un âge physiologique donné avant récolte, contribue à cette variation.

2. — *Quantité d'azote absorbée par les deux sorghos*

Les résultats montrent (fig. 1A et 1B ; tabl. 4, p. 99) que la quantité d'azote absorbée au cours de chaque cycle n'est pas directement liée aux apports de fumure, lesquels permettent à l'ensemble sol-fumure de fournir aux cultures des quantités d'élé-

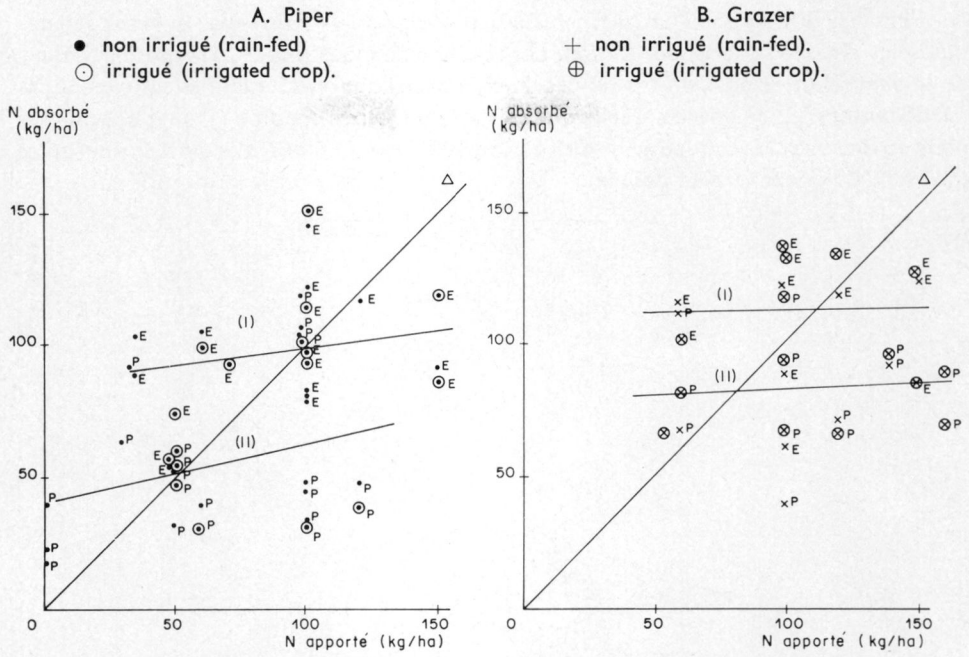


FIG. 1. — *Relations quantité d'azote absorbé-quantité d'azote apport dans les différents cycles d'exploitation des deux Sorghos, pour ensilage* (I) *ou pâture* (II).

Δ : Niveau d'équilibre : N absorbé = N apporté.

P Pâture ; E : coupe pour ensilage.

Relationship between nitrogen uptake and nitrogen fertilizer amounts in the different cropping uses of the two Sorghums (I : *cutting for ensilage* ; II : *pasture*).

Δ : Equilibrium level : absorbed N = fertilizer N.

P : pasture cycle ; E : ensilage cutting.

ment généralement non limitantes ; de même, le climat de l'année et les conditions d'alimentation hydrique n'ont pas d'effet systématique. C'est essentiellement la capacité des plantes à absorber l'azote qui joue le rôle déterminant : aussi, les quantités moyennes absorbées varient-elles surtout selon le stade physiologique et selon le type végétal : les « pâtures », exploitées lorsque la plante est encore en cours de croissance renferment donc des quantités d'azote plus faible que les coupes ensilage effectuées au début du stade épiaison. Les résultats montrent en particulier (fig. 1A et 1B) que le niveau moyen des fumures qu'il serait souhaitable d'apporter en prévision des exportations par la première pousse atteint, chez Piper, environ 60 kg N/ha dans l'exploitation en pâture et 100 kg/ha pour la coupe ensilage, tandis que les apports correspondants pour Grazer devraient être de l'ordre de 80 et 110 kg N/ha.

En revanche, à l'échelle de la production annuelle totale de chaque sorgho, il existe des relations directes entre apports et exportations d'azote (fig. 2, courbes I et II) avec toutefois un accroissement des quantités absorbées beaucoup plus faible que celui des fumures d'où des bilans d'azote négatifs avec les forts apports (cas de Piper quel que soit le mode d'exploitation et de Grazer dans l'exploitation en coupe ensilage suivie ou non de pâture). Le bilan est équilibré pour des apports de 240 kg N/ha

chez Piper et 200 kg chez Grazer, mais les sorghos peuvent absorber et valoriser des quantités d'azote supérieures (fig. 2). Les sorghos de type Grazer exploités en pâture seulement (et quelques pâtures suivies de coupe ensilage) présentent le cas exceptionnel de bilans d'azote positifs, quelle que soit la fumure ; en conditions tout particulièrement favorables, la culture peut alors absorber des quantités d'azote considérables (point P ⊗, Grazer irrigé pâturé).

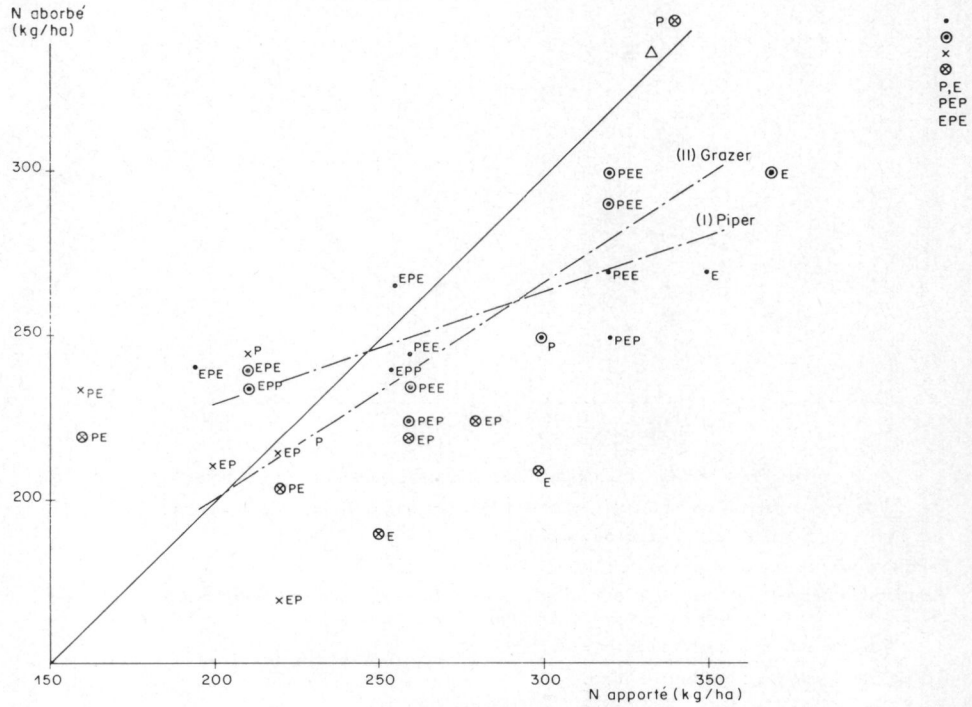


FIG. 2. — *Quantités d'azote absorbé et apports cumulés dans les différentes cultures au terme de leur exploitation.*

(Relation moyenne observée chez Piper (I) et chez Grazer (II).

Δ : Niveau d'équilibre : N absorbé = N apporté.

● Piper non irrigué.
⊙ Piper irrigué.
× Grazer non irrigué.
⊗ Graser irrigué.
P, E : Exploitation en pâture ou coupe ensilage seule.
PEP, EPE : modes d'exploitation successifs.

Total quantities of yearly absorbed nitrogen and of yearly used fertilizer nitrogen.

(Mean relationship for Piper (I) or for Grazer (II)

Δ : Equilibrium level : absorbed N = fertilizer N.

PE, EP, EPP... Successive uses of the crop.

Les résultats mettent donc en lumière le niveau très différent des quantités d'azote utilisées selon le type de sorgho et son mode d'exploitation : quantités élevées pour Grazer exploité en pâture, beaucoup plus faibles dans une récolte pour ensilage, entre lesquelles se situent, peu différentes, selon le mode d'exploitation, celles du sorgho de type Piper.

3. — *Quantité d'azote absorbé et production végétale*

Il existe des relations positives étroites entre azote absorbé et production au stade pâture quel que soit le type de Sorgho (fig. 3, droite I) mais les rapports diffèrent nettement au stade coupe ensilage entre les deux plantes (fig. 3, courbes II_G et II_P).

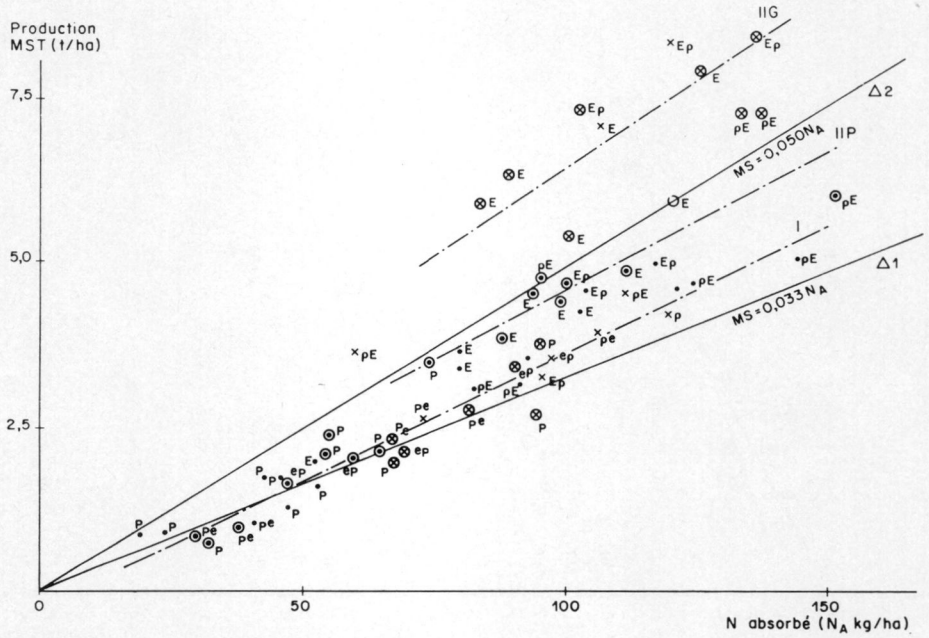


FIG. 3. — *Quantité d'azote absorbé et production des deux sorghos au cours de chacun de leurs cycles d'exploitation. Relation* MS = f (N *absorbé au stade pâture chez les deux plantes* (I) *et au stade coupe épiaison chez Piper* (II_P) *et chez Grazer* (II_G).

P, Pe, eP : pâtures ; E, Ep, pE : coupes pour ensilage.

Quantities of absorbed N and corresponding yield of the two Sorghum types during each production period. Relationship D. M. = f (*absorbed* N) *at pasture stages in the two crops* (I) *or at ensilage cutting times in Piper* (II_P) *or in Grazer* (II_G).

P, Pe, eP : pasture cycles ; E, Ep, pE : ensilage cuttings.

Pour l'ensemble des pâtures et quels que soient le type de sorgho, l'année climatique et l'alimentation hydrique, la période de récolte et le niveau de rendement, quantité d'azote absorbé (Na) et production (MS) sont liées par une relation hautement significative que représente la droite I d'équation : MS (t/ha) = 0,039 Na (kg/ha) — 0,187. Cette droite est voisine de Δ_1, d'équation MS (t/ha) = 0,033 Na (kg/ha) qui sépare les échantillons renfermant plus de 3 p. 100 d'azote de ceux qui en renferment moins. Les données expérimentales montrent ainsi que la teneur en azote des 2 sorghos récoltés au stade pâture est voisine de 3 p. 100 ; souvent un peu supérieure à ce taux lorsque la production est faible (de l'ordre d'une tonne de matière sèche par hectare), elle tend toutefois à décroître au fur et à mesure que l'absorption d'azote et l'élaboration des matières végétales augmentent.

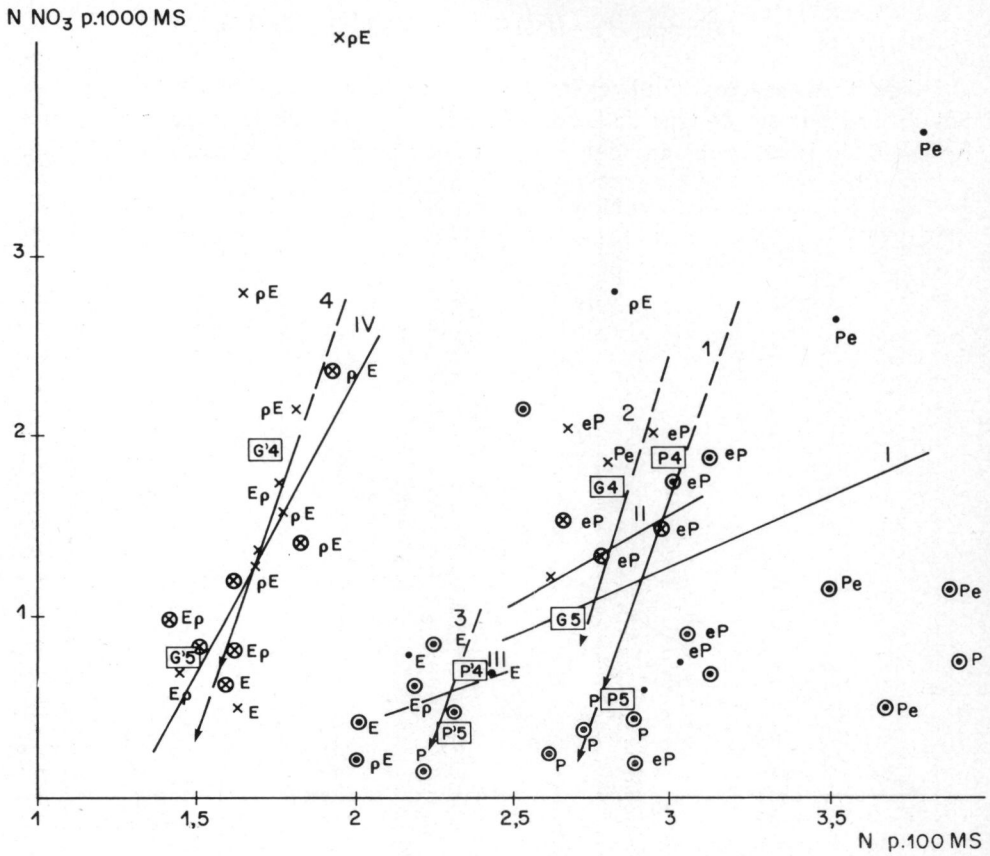


FIG. 4. — *Relation entre les teneurs en azote nitrique et en azote total chez les deux sorghos.*

I, II, III, IV : relations $N.NO_3^-$ p. 1000 MS = f(N/G p. 100 MS) aux stades pâture (I, II) et coupe épiaison (III, IV) chez Piper et Grazer respectivement.

1, 2, 3, 4 : droites homologues, supports des vecteurs P_4P_5, G_4G_5, P'_4, P'_5, $G'_4G'_5$.

P_4, P_5, G_4, G_5, P'_4, P'_5, G'_4, G'_5 : teneurs moyennes en les deux formes d'azote chez les 2 espèces selon le mode et l'année d'exploitation :

	Piper (Sudan-grass)		Grazer (hybride Sudan × Sorgho)	
	Pâture	Coupe ensilage	Pâture	Coupe ensilage
1972	P_4	P'_4	G_4	G'_4
1973	P_5	P'_5	G_5	G'_5

Points représentatifs particuliers : voir figure 3.

Relationship between nitric and total nitrogen contents in the two Sorghum types.

I, II, III, IV : $N.NO_3$ p. 100 D.M. = f(N_t p. 100 D.M.) ; pasture stage (I, II) and ensilage cutting stage (III, IV) in Piper and Grazer respectively.

1, 2, 3, 4 : homologous lines which enclose P_4P_5, G_4G_5, $P'_4P'_5$ and $G'_4G'_5$ vectors.

P_4, P_5, G_4, G_5, P'_4, P'_5, G'_4, G'_5 : nitric and total nitrogen contents of the 2 Sorghums differently harvested or cropped during 2 characteristic years.

Representatives points : see figure 3.

Les échantillons récoltés au stade épiaison présentent des quantités d'azote absorbé assez différentes mais surtout des masses de matière élaborée beaucoup plus considérables, ce que traduit le décalage en ordonnées des courbes II de la figure 3. Ceci résulte de l'écart physiologique important qui sépare l'absorption de l'azote, phénomène qui devient précocement très intense, de la photosynthèse nette dont la phase exponentielle rapide se poursuit au-delà du stade pâture, ce qu'illustrent bien les résultats ci-dessous (tabl. 3). Nous voyons aussi que les deux sorghos présentent des équilibres photosynthèse nette-absorption d'azote différents et dont les effets se manifestent à la fois au stade pâture et lors de la coupe pour ensilage (épiaison) ; la variété Grazer présente alors des teneurs en azote inférieures à 2 pour 100 tandis que celles du type Piper demeurent supérieures à ce seuil (tabl. 3, fig. 3).

TABLEAU 3

Absorption de l'azote et photosynthèse nette. Niveaux comparés aux stades pâture et épiaison chez les 2 sorghos
(Année 1972 ; premier cycle des deux cultures)

Nitrogen uptake and gross photosynthesis.
Comparison between the 2 Sorghums at pasture stage or ensilage cutting stage
(1972 : first harvest of the 2 crops)

	Stade pâture (Montaison)				Stade épiasion				Evolution entre les 2 stades	
	N absorbé (kg/ha)	Nbre de jours après la levée	Matière sèche récoltée (t/ha)	Teneur correspondante en azote (N p. 100 MS)	N absorbé (kg/ha)	Nbre de jours après la levée	Matière sèche récoltée (t/ha)	Teneur correspondante en azote (N p. 100 MS)	N absorbé (kg/ha)	Matière sèche récoltée (t/ha)
Piper ..	36,3	21	0,98	3,7	98,0	35	4,35	2,3	61,7	3,37
Grazer .	73,5	35	2,56	2,9	110,0	62	7,06	1,6	36,5	4,50

4. — *Utilisation de l'azote absorbé par les sorghos fourragers. Teneurs en azote total et en azote nitrique*

Les données font apparaître (fig. 4) la très large variation des teneurs en azote nitrique des diverses récoltes : 15 récoltes sur 70 renferment plus de 1,5 p. 1 000 d'azote nitrique, teneur qui est toutefois inférieure à celles qui sont aujourd'hui considérées comme toxiques pour l'animal (Crawford *et al.*, 1971 ; Meissonnier *et al.*, 1977).

L'examen sommaire de ces cas amène à constater que les teneurs en nitrates varient à la fois selon le type végétal et son mode d'exploitation et selon les conditions de climat et d'alimentation hydrique des cultures. En effet, parmi ces 15 situations, on note une dominance :

— du type Grazer (10 cas) par rapport à Piper (5),
— des exploitations en pâture (11) par rapport à la coupe ensilage (4),
— des récoltes 1972, année la plus froide (13), comparées à celles de 1973 (2),
— des cultures sèches (9) par rapport aux cultures irriguées (6),

Un examen de l'ensemble des résultats vient confirmer ces premières observations.

Variations selon le type de sorgho et le mode d'exploitation

Il ressort de l'ensemble des données que, dans les conditions de culture et d'exploitation réalisées, le sorgho type Grazer renferme davantage de nitrates que Piper, ce qu'illustrent sur la figure 4 les positions des courbes I et II, d'une part, III et IV d'autre part, relatives aux stades pâture ou coupe ensilage. A ce dernier stade, l'écart entre les sorghos est, dans l'ensemble, plus grand : tandis que Piper renferme des quantités faibles et peu variables de nitrates, Grazer, plus pauvre en azote total, présente des teneurs beaucoup plus diverses et le plus souvent très élevées (courbe IV).

Du stade pâture au stade fauche, nous voyons *chez Piper* les récoltes s'appauvrir à la fois en azote total et en nitrates. Simultanément, la part d'azote nitrique dans le pool de cet élément diminue. Mais au stade pâture, l'équilibre nitrates-azote total peut être extrêmement différent selon la période de la vie de la plante dans laquelle se situe la production. Lors des premières coupes (points Pe de la figure), l'absorption d'azote l'emporte de beaucoup sur les possibilités qu'a la plante d'assimiler les quantités d'élément absorbées ; la teneur en nitrates peut, dans certaines conditions, atteindre des niveaux très élevés (Pe, culture sèche). Par la suite, le rapport des cinétiques d'absorption de l'azote et de photosynthèse nette se modifie en faveur du métabolisme du carbone et les quantités d'azote non métabolisé dans le végétal diminuent (points E, courbe III).

Chez Grazer, les mécanismes apparaissent plus complexes : si l'on observe encore une grande dilution de l'azote dans la plante entre les deux états physiologiques, il semble que puisse subsister, lors de l'épiaison, un éventail de teneurs en nitrates très diverses selon les conditions de croissance et de développement. Ainsi, les teneurs en nitrates se sont avérées très supérieures en 1972 à celles des récoltes 1973 ; de plus, pour une même année de culture (1972), dans les exploitations en coupe ensilage après pâture (points pE de la figure), les taux de nitrates sont beaucoup plus élevés que ceux des coupes précoces (Ep) plus particulièrement en culture non irriguée (fig. 4). Des différences hélio-thermiques et hydriques peuvent contribuer à expliquer ces résultats.

Influence des conditions de climat et de l'irrigation

Les différences moyennes de composition des récoltes des deux sorghos en 1972 et en 1973, sont représentées sur la figure 4 par les vecteurs P_4P_5, G_4G_5, $P'_4P'_5$, $G'_4G'_5$ que supportent respectivement les droites 1, 2, 3, 4. En 1972 (points P_4, G_4, P'_4, G'_4), les teneurs des plantes en azote ont été en moyenne très légèrement supérieures à celles des plantes collectées en 1973 mais c'est surtout au niveau des taux de nitrates qu'apparaissent les écarts les plus importants : les teneurs moyennes en azote nitrique sont demeurées, en 1973, inférieures à 0,5 pour 1 000 chez Piper au stade pâture et inférieures à 0,75 pour 1 000 chez Grazer en début épiaison alors que les taux correspondants, en 1972, étaient en moyenne respectivement supérieurs à 1,5 et 1,75 p. 1 000. Les conditions climatiques de 1972 ont été marquées par un important déficit héliothermique (tabl. 1). Celui-ci n'a affecté que faiblement l'alimentation azotée des sorghos mais a par contre limité la photosynthèse et en particulier la fourniture de sub-

strats carbonés et d'énergie nécessaires à la protéosynthèse d'où une accumulation d'azote non métabolisé, qui représente dans certaines situations plus de 10 p. 100 de la quantité totale de cet élément dans la plante. Tel est en particulier le cas du sorgho Grazer récolté en coupe ensilage après une pâture. Les conditions héliothermiques durant ce cycle de production, comparées à celles que rencontre une production plus précoce (Ep) durant la même année et à celles qui ont pu être obtenues l'année suivante montrent qu'il existe une influence particulièrement nette de celle-ci sur l'utilisation de l'azote dans la plante chez ce type de Sorgho.

Par ailleurs, on observe que pour des conditions héliothermiques comparables, l'irrigation favorise généralement la croissance et le développement de la plante et ainsi, le métabolisme de l'azote, comme le montrent, par exemple, les nettes différences de taux de nitrates des pâtures de Piper irriguées ou non irriguées (Pe : 1,9 et 3,2 N.NO_3^- p. 1 000 MS, fig. 4) ou de Grazer au stade ensilage (pE : 2,0 et 3,5 N.NO_3^- p. 1 000 MS, fig. 4).

TABLEAU 4

Relation entre les grandeurs étudiées

Relationship between the two studied quantities

Figure n°	Courbe n°	Terme constant b	s_b	Coefficient de régression a	s_a	Coefficient de corrélation r		Test d'égalité (t) b	Test d'égalité (t) a
1A	I	89,7	2,67	0,13	0,26	0,21	NS	4,59	0,30 NS
	II	43,5	9,7	0,22	0,15	0,29	NS		
1B	I	113,5	26,2	— 0,02	0,24	0,03	NS	1,15 NS	0 NS
	II	79,2	14,0	0,02	0,14	0,03	NS		
2	I	157,1	21,1	0,35	0,08	0,75	**	1,53 NS	1,29 NS
	II	71,9	51,6	0,64	0,21	0,69	*		
3	I	— 0,187	0,122	0,039	0,002	0,96	**	1,48 NS	0,5 NS
	II_P	0,500	0,447	0,041	0,004	0,89	**		
								1,05 NS	2,94
	II_G	0,970	1,090	0,069	0,010	0,86	**	0,40 NS	7,0 **
4	I	— 0,91	1,05	0,72	0,36	0,38	*	0,00 NS	0,14 NS
	$1_{(1)}$	— 5,82		2,20					
	III	— 0,82	1,44	0,62	0,62	0,29	NS		
	$3_{(1)}$	— 10,96		5,0					
	II	— 1,52	0,81	1,04	0,29	0,70	**	1,59 NS	2,72 *
	$2_{(1)}$	— 17,3		6,7					
	IV	— 3,65	1,07	2,92	0,63	0,83	**		
	$4_{(1)}$	— 8,2		5,6					

(1) Droites supports des vecteurs P_4P_5, $P'_4P'_5$, G_4G_5, $G'_4G'_5$.
(1) Lines which enclose P_4P_5, $P'_4P'_5$, G_4G_5, $G'_4G'_5$ vectors.
NS Ecart non significatif.
NS n. s. d.
* Ecart significatif au seuil de 5 p. 100.
* s. d. 5 p. 100 level.
** Ecart significatif au seuil de 1 p. 100.
** s. d. 1 p. 100 level.

Toutefois, à côté des écarts très nets observés qui résultent des différences de type végétal, de mode d'exploitation, de conditions de climat et d'alimentation hydrique, existent aussi des différences non prises en compte dans notre analyse ; il s'agit notamment des écarts dus au rang de l'exploitation en pâture ou coupe ensilage dans la série annuelle des exploitations, aux interactions probables de ceux-ci avec les conditions de milieu et à diverses variations aléatoires. Ceci crée, autour des différentes relations observées et étudiées, un « bruit de fond » que nous avons enregistré et évalué dans les divers cas par l'analyse statistique des données (tabl. 4).

Discussion et conclusions

Les deux types de sorghos fourragers offrent des cas d'utilisation de l'azote des fumures très différents selon le mode d'exploitation et les conditions climatiques et culturales.

Le sorgho Piper, qui est un Sudan-grass, morphologiquement le plus proche de nos graminées tempérées par sa tige grêle et l'abondance de son appareil foliaire, permet d'obtenir des pâtures très riches en azote et relativement pauvres en nitrates. Les coupes ensilage correspondantes, quoique moins riches, demeurent toutefois bien pourvues en matières azotées (plus de 2 p. 100 d'azote, moins de 0,6 p. 1 000 sous forme nitrique, en moyenne).

Le Grazer, qui est un hybride Sorgho-Sudan, est en revanche moins apte à produire une matière végétale à la fois riche en matières azotées et faiblement pourvue en nitrates. Chez ce type de plantes, plus proche du Sorgho-grain, les organes de transfert (tiges et gaines) jouent un rôle plus important dans la structure du végétal. Or on sait que l'azote ne s'accumule guère en formes protéiques stables dans ce type d'organe, quelle que soit l'espèce végétale, mais qu'il y est présent surtout sous des formes mobiles, au premier rang desquelles figure généralement la forme nitrique, d'où des teneurs en nitrates parfois élevées tandis que la teneur en azote total demeure faible, souvent inférieure à 2 p. 100.

La teneur des différentes récoltes en azote total et en nitrates est aussi très variable selon les conditions climatiques. Mais si l'agriculteur ne maîtrise pas les facteurs naturels qui règlent l'utilisation de l'azote par la plante, il peut agir en adaptant son système et son rythme d'exploitation aux conditions de milieu : prolonger la durée de végétation entre les coupes, et donc la contribution héliothermique, lorsque les conditions de température et d'insolation ne sont pas favorables, faire appel à l'irrigation quand on peut en attendre à la fois un supplément de production et un accroissement de la qualité des récoltes obtenues par abaissement du taux des nitrates. Cette dernière préoccupation devra toutefois conduire à prendre aussi en compte les problèmes liés à la présence de glucosides toxiques.

Reçu pour publication en mars 1979.

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Coppenet (Station d'agronomie I.N.R.A. de Quimper) et M. Salette (Station d'agronomie I.N.R.A. d'Angers) pour les remarques et les conseils qu'ils nous ont apportés lors de la rédaction du présent mémoire.

Summary

Utilization of fertilizer nitrogen by fodder sorghum

Different aspects of the production of fodder sorghum (a Sorghum Sudense Stapf., of the Piper variety and one hybrid Sorghum bicolor L. Moench × Sorghum Sudense Stapf., of the Grazer variety) were studied in relation to the utilization of nitrogen by the cultures : - the rythms of the production cycles, the amount of nitrogen absorbed by plants, the manuring effects, the nitrogen utilization in the plant production and the quality of the products (total nitrogen content, presence of nitrate nitrogen) were faced in turn as a function of :

— the nitrogen supply,
— the plant type,
— the mode of exploitation (pasture or silo cutting),
— the climatic conditions of the year.

The results show the variability of the length and number of the exploitation cycles according to the type of sorghum and the year of culture : from two cycles (pasture + silo cutting) for Grazer in a cold year to six pasture cycles for Piper in a normal year ; the amount of the absorbed nitrogen during the cycle differs according to the type of sorghum and its mode of exploitation : 60 and 100 kg N/ha for Piper in average, 80 and 110 kg N/ha for Grazer at the stages of pasture and silo cutting respectively but they are very variable and independant from the nitrogen supply. For the cycles of a year of culture as a whole the total plant production depends at the same time on the type of sorghum (it is superior in Grazer), on its mode of exploitation (higher in the cycles with silo cutting) and on the fertilization. The manure used which aims at supplying the amount of element necessary to obtain a production with anitrogen content of 2 p. 100 leads to the production of plant material generally containing more than 2 p. 100 nitrogen and reaching even 3 p. 100 (case of some pastures with Piper) ; The Grazer exploitation as silo cutting presents however contents inferior to the ones aimed at.

A part of the absorbed nitrogen remained in the plant under the form of nitrates ; the contents are generally higher at pasture stage than at silo cutting stage, in Grazer than in Piper ; they widely differ according to the climatic conditions ; during cold years there is a bigger nitrate storage.

The results show as a matter of fact that the two types of sorghum present a very different capacity to utilize nitrogen.

The farmers will have to choose between a type which produces (at earing stage) a lot of plant material (and of energy available for the animal) but rather poor in nitrogen (case of an hybrid Sorghum × Sudan such as Grazer) or a less productive type (case of a Sudan-grass such as Piper) but insuring a better nitrogen utilization and containing thus more proteins.

Zusammenfassung

Verwertung des Stickstoffes der Düngung durch die Futtermohrenhirsen

Verschiedene Aspekte der Erzeugung von Futtermohrenhirsen (eine Mohrenhirse Sudense Stapf., der Piper Sorte, und ein Hybrid Sorghum bicolor der Grazer Sorte) sind in Verbindung mit der Verwertung des Stickstoffes durch die Kulturen untersucht worden : — die Rythmen der Erzeugungszyklen, die Mengen von absorbiertem Stickstoff, die Düngunseffekte, die Verwertung des Stickstoffes in der Pflanzenerzeugung und die qualität der Produkte (Gehalt an Gesamtstickstoff, Anwesenheit von salpetersauerem Stickstoff) wurden im Verhältnis mit :

— der zugeführten Stickstoffdüngung,
— dem Pflanzentyp,
— der Ausnutzungsweise (Wiese oder Schnitt für Einlagerung in Silo),
— den Jahresklimaverhältnissen, der Reihe nach berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen die Variabilität der Länge und der Zahl der Ausbeutungszyklen je nach dem Mohrenhirsetyp und dem Kulturjahr : von zwei Zyklen (Wiese + Schnitt für Siloeinlagerung) für Grazer während eines kalten Jahrs bis zu sechs Zyklen von Wiese für Piper während eines normalen Jahrs ; die während des Zyklus absorbierten Stickstoffmengen sind je nach dem Mohrenhirsetyp und der Ausbeutungsweise verschieden : 60 und 100 kg N/ha bei Piper im Durchschnitt, 80 und 110 kg N/h bei Grazer zum Wiesestadium beziehungsweise sum Schnitt für Siloeinlagerung, aber sie sind sehr veränderlich und von der zugeführten Stickstoffdüngung unabhängig. Für die gesamten Zyklen eines

Kulturjahrs hängt die gesamte Pflanzenerzeugung zugleich von dem Mohrenhirsetyp (sie ist höher bei Grazer), der Ausbeutungsweise (höher in den Zyklen mit Schnitt für Siloeinlagerung) und von der Düngung ab. Die durchgeführte Düngung, die zum Ziel hat, die für das Erreichen eines Produkts mit 2 % Stickstoff nötige Menge des Elements zu verabreichen, führt zu der Erzeugung von Pflanzenmaterial, das im allgemeinen mehr als 2 % Stickstoff und manchmal sogar 3 % (Fall gewisser Wiesen mit Piper) enthält ; die Ausbeutung von Grazer als Schnitt für Siloeinlagerung zeigttrotzdem niedrigere Gehalte als der geplante Prozentsatz.

Ein Teil des aufgenommenen Stickstoffes ist in der Pflanze als Nitrate verblieben ; die Anteile sind im allgemeinen höher im Stadium « Wiese » als im Stadium « Schnitt für Siloeinlagerung » bei Grazer wie auch bei Piper ; sie ändern sich weitgehend je nach den Klimaverhältnissen ; im kalten Jahr wird eine grössere Speicherung an Nitraten beobachtet.

Die Ergebnisse zeigen schliesslich, dass die zwei Typen von Mohrenhirse eine sehr verschiedene Fähigkeit zur Verwertung des Stickstoffs haben.

Die Bauern werden zwischen einem Typ wählen, der viel Pflanzenstoff (und viele für das Tier verfügbare Energie) zur Ahrenbildung erzeugt, aber verhältnismässig arm an Stickstoff ist (Fall eines Hybrids Sorghum × Sudan wie Graze), und einem weniger ertragreichen Typ (Fall eines Sudangrass wie Piper) der eine bessere Verwertung des Stickstoffes gewährt und deswegen mehr Proteine enthält.

РЕЗЮМЕ

Использование азота удобрений растениями кормового сорго.

Деко Ж., Марти Ж. Р.

Изучались разные аспекты продукции кормового сорго (Sorghum Sudense Stapf., сорт Пипер и гибрид Sorghum bicolor L. Moench × Sorghum Sudense Stapf., сорт Гразер), в зависимости от использования азота их культурами. Ритм циклов про дукции, количества поглощенного азота, эффект удобрений, ислользование азота для растительной продукции, и качество полученных продуктов, поочередно рассматривались в зависимости от :

— внесенного азотного удобрения ;
— типа растений ;
— способа эксплуатации (пастбище, или укосы на силос) ;
— климатических условий года ;

Результаты указывают на изменчивость продолжительности и количества циклов эксплуатации, в зависимости от типа сорго и года культуры : от 2 циклов (выпас + укос на силос) в случае сорта Гразер в холодные годы, до 6 циклов выпаса о случаех сорта Пипер в нормальные годы ; количества азота, поглощенные в течении одного цикла изменялись в зависимости от типа сорго и способов его культуры : от 60, до 100 кг. га азота были необходимы в среднем, в случае сорта Пипер, и от 80, до 110 кг. азота/га в среднем-для сорта Гразер на стадиях выпаса и укоса на силос. Количества эти изменчивы и не зависят от сорта внесенного азотного удобрения. Общая растительная продукция суммы циклов года культуры, зависит одновременно от типа сорго (продукция больше в слчае сорта Гразер), от способа культуры (продукция больше в течении циклов с укосом на силос) и от удобрения. Удобрение, рассчитанное с целью внесения количеств азота, необходимых для получения продукции содержащей 2 % этого элемента, приводит к получению растительного материала содержащего больше требуемых 2 %, и часто даже около 3 % (некоторые пастбища сорта Пипер) ; однако, культуры сорта Гразер на укос для силоса, часто содержат менее 2 % азота.

Часть поглощенного растениями сорго азота остается в растении в виде нитратов ; содержание их, в большинстве случаев выше на стадии пастбища, чем при укосах на силос, и у сорта Гразер, чем у сорта Пипер ; содержание это сильно меняется в зависимости от климатических условий ; в холодные годы нитратов накопляется больше.

В общем, полученные результаты указывают на очень разную способность использования азота этими двумя типами сорго.

Сельские хозяева могут значит выбирать между двумя типами сорго : один из них дает (на стадии колошения) крупные количества растительного материала (и наличной энергии для животных), но содержит относительно малые количества азота (гибрид Сорго х Судан, подобный Гразеру), а другой, менее продуктивный, (сорт Пипер), обеспечивает зато лучшее использование поглощенного азота и содержит поэтому больше протеинов.

Références bibliographiques

CRAWFORD R. F., KENNEDY W. K., JOHNSON W. C., 1971. Some factors that affect nitrate accumulation in forages. *Agron. J.* **53,** 159-162.

DEMARQUILLY C. et WEISS Ph., 1970. Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages. *SEI (I.N.R.A.) Etude n°* 42.

FERRET M., 1977. Sorghos fourragers : techniques culturales et choix des variétés. *Cultivar* 104, 29-30.

HUGUES P., 1968. Recherches relatives à la toxicité des plantes vertes des Sorghos fourragers pour le bétail. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 596-601.

HUGUES P., 1969. Quelques données récentes relatives à la détermination de la teneur en acide cyanhydrique des plantes jeunes de sorghos fourragers, en vue de l'évaluation de leur toxicité possible pour le bétail. *Fourrages* **40,** 39-44.

MARTY J. R., PUECH J., 1971. Efficience de l'eau en production fourragère. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 938-949.

MEISSONNIER E., MATHIEU J., MAUPETIT P., 1977. Les nitrates dans l'alimentation des ruminants. *Perspectives agricoles* **10,** 62-74.

Ann. agron., 1979, **30** (1), 105-107.

Chronique des livres

L. 't MANNETJE, éd. — *Measurement of Grassland Vegetation and Animal Production.* Farnham Royal, Commonwealth Agricultural Bureaux, 1978, 260 p.

Ce livre a été écrit par 7 spécialistes australiens des pâturages. Son but est de permettre une initiation critique aux méthodes actuelles de mesure des végétations prairiales concernant la composition botanique, la composition chimique, les productions végétale et animale, et de servir de guide, y compris pour le traitement statistique.

En 200 pages environ, les auteurs traitent de 6 thèmes principaux :

— Aspects statistiques de l'échantillonnage de la végétation	13 p.
— Mesure de la composition botanique des prairies	34 p.
— Mesure de production de la végétation prairiale	27 p.
— Etudes de la production animale au pâturage	59 p.
— Mesure des performances animales	54 p.
— Méthodes de modélisation dans les études de végétation	15 p.

La clarté et la concision, un effort constant de précision dans les définitions, fruits d'une longue pratique de la recherche sur les pâturages et leur utilisation, font de cet ouvrage un outil intéressant que les exemples exotiques n'obèrent nullement.

F. de M.

L'I.N.R.A., l'eau et la production agricole. 269 p., 21 × 29,7, en rédaction collective. Les annexes comprennent des inventaires des publications et des opérations de recherches (*qui* fait *quoi* et *où* ?). Edité par le Service des Publications du S.E.I., C.N.R.A., route de St-Cyr, 78000 Versailles.

La compétition pour l'eau s'accentue de plus en plus, même dans des pays tels que la France. Il est donc nécessaire d'assurer une gestion rigoureuse et une valorisation optimale de l'eau.

L'agriculture intervient en tant qu'utilisateur de la ressource, mais elle est aussi fournisseur, ce que l'on oublie souvent : l'espace rural est, en effet, notre plus important collecteur d'eau. De plus, cet espace rural constitue, grâce à l'énergie lumineuse, le seul transformateur d'eau et de gaz carbonique en biomasse consommable : la nourriture journalière d'un individu requiert l'évaporation de 10 m^3 d'eau. Cette eau est recyclée par condensation dans les systèmes nuageux et redevient ressource.

10 p. 100 des chercheurs de l'Institut National de la Recherche Agronomique (I.N.R.A.) sont concernés depuis 30 ans par les problèmes de l'eau. L'ouvrage « L'I.N.R.A., l'Eau et la Production agricole » fait le point de ces recherches.

La France a pris une position reconnue au niveau international grâce aux connaissances acquises sur les besoins en eau des différentes cultures au long de leur cycle de vie, dans des contextes variés de sol et de climat. Les performances de la plante à l'égard de l'eau ont pu ainsi être notablement améliorées.

Les stratégies d'utilisation de l'eau selon les conditions de milieu physique et humain mettent en œuvre des technologies avancées telles que le drainage et l'irrigation, ou à l'opposé, cherchent à adapter les systèmes de cultures aux conditions humides ou sèches. On peut maintenant parler de *bio-aménagement spatio-temporel.*

Deux exemples extrêmes illustrent cette approche :

— Dans les marais côtiers du Centre-Ouest, la mise en valeur passe par la maîtrise du plan d'eau et apporte des solutions très diversifiées : production animale et céréaliculture intensive.

— Dans les Causses, on dispose d'un éventail assez large de solutions pour l'exploitation des surfaces sèches de parcours : utilisation estivale extensive, utilisation permanente avec complémentation alimentaire, utilisation après aménagement important.

Pour mieux gérer l'eau en agriculture, l'I.N.R.A. contribue à mettre au point des méthodologies très variées, allant de la carte pédologique à la télédétection, en passant par l'enquête géographique et l'agrométéorologie.

En conclusion, on aborde les implications économiques des différentes stratégies de gestion : l'emploi de l'eau ne conduit pas seulement à accroître la production, mais modifie le système de production à l'échelle de l'exploitation, et induit des variations à tous les niveaux de l'environnement socio-économique. Cette façon de considérer l'impact de l'eau est transposable à tous les pays, quel que soit leur niveau de développement.

PEARCE S. C. — *Introduction à la statistique en biologie.* Traduction de J. P. Doazan. Edité par le Service des publications du S.E.I., C.N.R.A., route de St-Cyr, 78000 Versailles.

« Les concepts mathématiques sont précis mais ils ne deviennent utiles qu'une fois appliqués et adaptés à la réalité ; les concepts biologiques sont plus subtils mais parfois trop vagues pour se prêter à une vérification expérimentale. L'amalgame des deux types de concepts peut avoir des qualités que ne possèdent ni l'un ni l'autre séparément ».

« ...mes explications se fondent davantage sur l'analyse d'expériences que sur le calcul des probabilités. »

« Ce livre est en fait plus une étude de la méthode scientifique qu'un précis théorique de statistique. »

« Le livre s'adresse en premier lieu à des biologistes désireux d'utiliser des techniques statistiques dans leurs recherches et qui, soit n'y connaissent rien, soit ont suivi des cours qu'ils ont trouvé trop ardus. »

Ces quelques phrases extraites de la préface de S. C. Pearce datent de 1965 ; qui peut nier qu'en 1978 elles soient toujours d'une brûlante actualité ?

Un ouvrage de ce type doit être lu par des biologistes . mais pour en faire une lecture approfondie. il est nécessaire que la langue ne constitue par un écueil ; c'est la raison d'être de cette traduction. On pourrait aussi souhaiter que des mathématiciens appelés à travailler avec des biologistes y jettent un œil attentif ; certes ils n'apprendront pas des techniques nouvelles, mais ils feront connaissance avec un langage auquel l'enseignement qu'ils ont suivi les a peu habitués.

GUINOCHET M. et de VILMORIN R. — *Flore de France.* Fascicule 3. 1978, 380 p., 64 pl. Publication du Centre National de la Recherche Scientifique.

Troisième fascicule de la Flore de France qui en comprendra cinq. La phytoécologie, base de l'étude de l'environnement, ne peut être pratiquée sans une connaissance parfaite de la Flore. C'est pour permettre à ceux qui s'adonnent à ces études d'identifier, avec le minimum de difficultés, les espèces et les associations végétales que ce livre a été écrit.

Il comporte donc, et c'est sa principale originalité, une clef de détermination des classes, ordres et alliances phytosociologiques de la France, ainsi que pour les espèces, l'essentiel de leurs relations phytosociologiques actuellement connues. Cet aspect écologique n'exclut pas, bien au contraire, une présentation taxonomique tout à fait à jour.

Table des matières : Phylym : Polycarpiques, Aristolochiales — Phylum : Hélobiées (fluviales) — Phylum : Piperales, Spadiciflores (Arales, Pandanales) — Phylum : Liliiflores — Orchidales.

Analyse de l'éditeur.

De WIT C. T. *et al.* — *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops.* PUDOC, Wageningen, 1978, 140 p.

Ce petit livre (140 p. format de poche) présente, sous une forme très pédagogique, un modèle de simulation du fonctionnement d'un couvert végétal à deux échelles de temps : d'une part sur le cycle annuel des saisons, d'autre part sur le cycle quotidien jour-nuit.

Les hypothèses, simplifications, etc... qui sous-tendent le modèle sont clairement expliquées et le retour aux conditions d'expérience permettent à chaque étape la confrontation des hypothèses avec les mesures réelles des termes du bilan des échanges de matière d'une culture avec le milieu ambiant.

Partant des données concernant le milieu (climat, rayonnement, température, humidité, vitesse du vent et eau) et des connaissances sur le fonctionnement physiologique des plantes (assimilation du CO_2, ouverture des stomates, respiration, synthèses, mise en réserves et remobilisation des réserves) le livre aboutit à l'exposé des deux modèles et à leur utilisation pour quantifier les termes les moins accessibles du bilan végétal tels que la croissance des racines.

L. C.

HANAN J. J., HOLLEY W. D., GOLDSBERRY K. L. — *Greenhouse Management*. Springer-Verlag, Berlin, 530 p., 1978. Advanced Series in Agricultural Sciences 5.

Cet ouvrage présente un panorama général des problèmes scientifiques, techniques et économiques posés par l'utilisation des serres ainsi que des exemples de réalisation très détaillés.

Les principaux chapitres sont :

— la lumière : lumière naturelle, lumière d'appoint, réactions photopériodiques...
— la construction d'une serre : matériaux de structure et de couverture, risques divers : vent, neige, feu, ...
— la température : chauffage, climatisation, ventilation, appareillages divers, ...
— l'alimentation hydrique : humidité de l'air, irrigation du sol, ...
— le sol : aération, amendements, sols inertes, ...
— la nutrition minérale : calculs de fertilisation, salinité, ...
— le gaz carbonique et la pollution : injections de CO_2, pollution de l'air...
— le contrôle des maladies et des parasites ;
— l'emploi des régulateurs de croissance ;
— la gestion d'une entreprise utilisant des serres.

Les lecteurs apprécieront la très bonne présentation de l'ouvrage, très riche en graphiques et photographies ainsi que les bibliographies ou suggestions de lecture d'ouvrages qui suivent chaque chapitre. Des tables de conversion et un chapitre de définitions complètent cet ouvrage qui intéressera les spécialistes mais aussi ceux qui doivent utiliser des serres ou des enceintes climatisées.

R. B.

LAMOTTE M., BOURLIERE F. — *Problèmes d'écologie : Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres*. Masson, Paris, 345 p., 1978. Publié sous les auspices du Comité Français du Programme Biologique International.

Après un premier chapitre qui rappelle le concept d'écosystème tel qu'il est maintenant admis par les écologistes et les principaux problèmes qui se posent à son sujet, le reste du volume développe une série d'exemples précis empruntés à la participation française au Programme Biologique International (1964-1974).

Les grandes divisions de l'ouvrage sont :

— la prairie permanente du nord ouest français ;
— la hêtraie naturelle de Fontainebleau ;
— la forêt méditerranéenne de chênes verts ;
— la savane sahélienne de Fété-Olé, Sénégal ;
— la savane préforestière de Lamto, Côte-d'Ivoire ;
— la forêt sempervirente de Basse Côte-d'Ivoire.

Ces divers programmes ne sont pas comparables dans le détail et ont été menés de façon plus ou moins approfondie ; cependant les résultats obtenus permettent de se faire une bonne idée des grandes lignes du fonctionnement de ces systèmes écologiques.

Les lecteurs apprécieront la bibliographie très complète regroupée par programme et qui permettra l'accès à des documents internes des laboratoires participants.

R. B.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse complète de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 7-1979

Dépôt légal : 3e trimestre 1979. N° d'impression : 26453

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1979	France Prix T.T.C.	Étranger Prix Net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix Net
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOLOGIE - ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	335 F	370 F	72 F	72 F

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 80 F — Étranger sauf R. F. A. : 130 F
— Le numéro : France : 25 F — Étranger sauf R. F. A. : 40 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn et M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... **60,00 F**

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... **27,00 F**

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... **38,00 F**

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... **168,50 F**

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... **168,50 F**

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... **95,50 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... **63,50 F**

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... **134,50 F**

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... **173,00 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1979, **30** (1), 1-107.

Table des matières

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME. — Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. II. — Interception de l'énergie solaire par une culture 1

P. STENGEL. — Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ* 27

J. E. DUFEY, C. M. PETIT, Y. GOBLET, H. LAUDELOUT. — Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échange et de précipitation dans les systèmes sol-eau-électrolyte 53

J. DEJOU, J. GUYOT, J. TRICHET. — Un exemple d'altération superficielle naissante sur roches basiques en région tempérée humide. Cas des gabbros dioritiques de la haute vallée de la Jordanne (Cantal) 63

J. DECAU, J.-R. MARTY. — Utilisation de l'azote des fumures par les sorghos fourragers 89

Chronique des livres 105

Contents

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME. — Radiation laws in diffusing medium applied to plant canopy. II. — Crop trapping solar energy 1

P. STENGEL. — Evaluation of textural and structural porosities : interest for the characterization of the physical state of soils 27

J. E. DUFEY, C. M. PETIT, Y. GOBLET, H. LAUDELOUT. — Modelization of physico-chemical equilibrium of exchange and precipitation in soil-water-electrolyte systems 53

J. DEJOU, J. GUYOT, J. TRICHET. — An example of a beginning weathering on basic rocks in humid temperate region. Case of dioritic gabbros of the Jordanne high valley (Cantal) 63

J. DECAU, J. R. MARTY. — Utilization of fertilizer nitrogen by fodder sorghum 89

Books review 105

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 9-036-001-5

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 2

inra

AAG
30.2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 30 (2) 109-216 (1979)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris-Grignon, Paris Cedex 05.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie, Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1979, **30** (2), 109-119.

Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau

II. — Utilisation d'un modèle mathématique à trois paramètres dont un phénoménologique

J. LE RENARD

Station de Science du Sol
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal D_H en milieu poreux homogène saturé en eau est décrite en détail. Elle permet une reproductibilité meilleure que 1 p. 100. La première partie (Ann. agron. 1977, **28** (6), 651-659) traitait des aspects méthodologiques. Dans la présente partie, l'application d'un modèle mathématique simple à un paramètre phénoménologique (D_H), est étudiée sous l'aspect de ses performances et de ses limitations. Une troisième partie traitera de l'utilisation d'un modèle à trois paramètres (modèle à trois phases).

Il est nécessaire, pour quantifier la dispersion hydrodynamique, d'adopter un modèle d'interprétation du phénomène. Dans le cas où l'on décrit le système comme constitué de deux phases (matrice solide délimitant les pores, et solution circulant dans ces pores) sans réaction d'échange entre elles, le modèle sera la solution de l'équation classique de la dispersion :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_H \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

pour les conditions initiales et aux limites correspondant aux conditions expérimentales choisies.

A. — Modèle mathématique. Programme de calcul

Dans cette partie, nous utiliserons celui des modèles simples qui nous est apparu le plus intéressant lors d'une étude comparative précédente (Le Renard *et al.*, 1977) ; il traduit, pour les conditions initiales et aux limites que nous avons adoptées dans le

plan d'expériences (voir 1re partie, § A, conditions 1 et 2, p. 652), la solution, donnée par Lapidus et Amundson (1952), de l'équation précédente ; il s'écrit (pour $t > t_m$) :

$$C(L, t) = G(L, t - t_0) - G(L, t - t_m)$$

où

$$G(L, T) = C_i + \frac{1}{2}(C_e - C_0)\left\{ \operatorname{erfc} \frac{L - \bar{v}T}{2\sqrt{D_H T}} + \exp \frac{\bar{v}L}{D_H} \operatorname{erfc} \frac{L + \bar{v}T}{2\sqrt{D_H T}} \right\} \quad (3)^*$$

erfc étant la fonction « erreur complémentaire » :

$$\operatorname{erfc}(y) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^y \exp(-z^2)\, dz .$$

Dans cette relation, C(L, t) est la concentration au temps t à une distance L de l'extrémité-amont de la colonne ; t_0 et t_m sont les temps de début et de fin de l'impulsion, $\bar{v}$ la vitesse moyenne dans les pores, et D_H le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal.

On doit admettre pratiquement que C(L, t) décrit la concentration que l'on mesure effectivement au temps t à la sortie de notre colonne de longueur L (du fait de l'hypothèse, utilisée lors de la résolution de l'équation différentielle, que la colonne a une *longueur infinie*).

Il faut donc s'attendre à ce que le modèle adopté ne soit pas exactement conforme à la réalité expérimentale, bien que l'erreur introduite soit minime. Il serait bien sûr possible d'utiliser un modèle plus « exact », donnant la concentration effective à la sortie d'une colonne de longueur L, mais l'expression de la relation correspondante serait plus lourde, et nous avons préféré adopter le modèle le plus simple dès l'instant que nous avons contrôlé que l'erreur introduite restait inférieure à la précision des mesures, même dans le cas d'une colonne relativement courte (L = 20 cm).

Le choix de L a un optimum difficile à définir. Augmenter L fait que l'hypothèse de la colonne semi-infinie se trouve mieux vérifiée ; mais en contrepartie les temps de transfert se trouvent corrélativement allongés, et il est plus difficile sur des expériences plus longues de respecter la condition de constance des paramètres expérimentaux (débit en particulier) ; de plus, pour un milieu poreux donné, le volume poral de la colonne est proportionnel à L, et donc aussi le volume de soluté à faire percoler.

Notons que $\bar{v}$ et $t_m - t_0$ peuvent être déterminés directement (sans avoir recours à un modèle) ; dans la littérature, ces valeurs sont ainsi traitées comme de simples paramètres expérimentaux (données), et le modèle utilisé est dit « à un paramètre » (D_H). Nous préférons les considérer (surtout $\bar{v}$, lié à la porosité « dynamique » du système) comme des paramètres ajustables. En tout état de cause, le seul paramètre phénoménologique étant D_H, il est très évident que le modèle utilisé ne sera applicable que pour des conditions expérimentales étroitement définies.

Le but de cette partie est de montrer comment l'on peut tirer le meilleur parti de l'utilisation de ce modèle sur le plan de la précision de la détermination des paramètres $\bar{v}$, D_H et $t_m - t_0$.

Partant d'une courbe d'élution mesurée, que nous noterons $C_{mes}(t)$ pour la dis-

* Les formules (1) et (2) figurent dans la 1re partie de ce mémoire (Ann. agron. 1977, 651-659).

tinguer de la courbe $C_{calc}(t) = C(L, t)$ calculée par le modèle, nous obtiendrons les valeurs des paramètres $\bar{v}$, D_H et $t_m - t_0$ correspondant à l'expérience par ajustement de $C_{calc}(t)$ à $C_{mes}(t)$. L'ajustement sera fait automatiquement, par la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire en déterminant le jeu de paramètres qui, introduit dans l'équation (3), donnera un résidu minimum, ce résidu étant calculé comme la somme des carrés des écarts, pondérée par la somme des carrés des mesures :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} [C_{calc}(t_i) - C_{mes}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^{n} [C_{mes}(t_i)]^2}$$

où l et n sont les bornes du domaine d'ajustement (délimitant le pic d'élution).

L'ajustement automatique se fait sur un petit ordinateur, grâce à un ensemble de programmes écrits en FORTRAN IV et disponibles auprès de l'auteur. La méthode des moindres carrés est mise en œuvre par un programme que nous avons mis au point (qui repose sur un algorithme d'optimisation du facteur d'amortissement). L'emploi de ces programmes ne pose aucun problème particulier, tant sur le plan de la stabilité des ajustements que sur l'unicité des solutions trouvées.

Les données nécessaires au programme sont :

— les numéros d'ordre l et n du premier et du dernier prélèvements utilisés pour l'ajustement ;

— les valeurs $C_{mes}(t_i)$ pour $i = l, \ldots, n$;

— les valeurs t_i correspondantes ; en fait, puisque l'on opère à débit Q constant, et que l'on effectue les prélèvements d'effluent à volume constant Δv donc à intervalle de temps constant Δt ($= \Delta v/Q$), on se limite à la donnée de Δt ;

— la valeur des paramètres de l'expérience : longueur L, diamètre $\varnothing$ et porosité ε de la colonne de milieu poreux ; valeur V_s du volume mort de sortie (qui induit un décalage en temps du pic d'élution observé) ; Δv, Δt ; t_m et t_0 ; C_e et C_0 ;

— une valeur approximative (disons à $\pm$ 500 p. 100 près) du coefficient D_H pour lancer l'ajustement.

D'autres paramètres en découlent :

— le débit $Q = \Delta v/\Delta t$;

— le volume poral de la colonne $V_p = \frac{\pi}{4} L \varnothing^2 \varepsilon$;

— l'intervalle de temps réduit correspondant à Δt :

$$\Delta\tau = \Delta v/V_p \qquad (4)$$

— la vitesse moyenne dans les pores $\bar{v} = L\, \Delta\tau/\Delta t$;

— la durée réduite de l'impulsion $\Delta T = (t_m - t_0)\, \Delta\tau/\Delta t$.

La courbe d'élution observée $C_{mes}(t_i)$ peut être suivant les cas soit un pic brut (directement mesuré lors d'une expérience), soit le même pic corrigé en tenant compte d'une expérience de l'« impulsion nulle » (voir première partie, § D1).

Pour être utilisables dans la formule (3), les temps t_i doivent être corrigés en tenant compte :

— de l'existence du volume mort de sortie V_s de la colonne, qui induit un retard de sortie du pic d'élution ;

— du fait que la concentration mesurée $C_{mes}(t_i)$ est celle de l'effluent prélevé entre les temps chronométrés $[t_0 + (i - 1)\,\Delta t]$ et $[t_0 + i\,\Delta t]$, donc une valeur moyenne que l'on peut assimiler à la concentration de l'effluent au temps $\left[t_0 + \left(i - \frac{1}{2}\right)\Delta t\right]$; d'où les valeurs corrigées :

$$(t_i - t_0) = \left(i - \frac{1}{2}\right)\Delta t - (V_s\,\Delta t/\Delta v)\,.$$

A partir de ces données, le programme procède à l'ajustement des trois paramètres D_H, $\Delta\tau$ et ΔT ; lorsque la valeur minimale du test d'ajustement R^2 est atteinte, le programme recalcule l'ensemble des paramètres, et les $C_{calc}(t_i)$. En particulier, une nouvelle valeur de ε est recalculée à partir de L, $\varnothing$, Δv et la valeur $\Delta\tau$ ajustée.

B. — Qualités de la redétermination des paramètres V_p et ϵ

L'ajustement de $\Delta\tau$ permet, puisque le paramètre expérimental Δv est facile à connaître avec précision, de déterminer par la formule (4) une nouvelle valeur de V_p, estimation du volume apparent de liquide dans la colonne qui contribue à la circulation. Cette valeur apparente, déterminée en conditions dynamiques, tient donc compte de l'existence éventuelle d'une petite quantité de liquide qui reste pratiquement immobile dans la colonne ; nous avons constaté dans nos résultats que le volume poral apparent V_p, s'il reste pratiquement égal au volume poral déterminé indépendammant (voir première partie, § D2, p. 658) pour des vitesses $\bar{v}$ dans les pores de l'ordre de 1,5 cm/h, tend à s'en écarter (en diminuant de 2 p. 100) pour $\bar{v} = 15$ cm/h ; tout se passe comme si la proportion de liquide qui circule effectivement dans la colonne par rapport au liquide total de cette colonne tend à diminuer lorsque le débit augmente.

On estime de même une porosité ε apparente en conditions dynamiques, proportionnelle à V_p apparent et pour laquelle on peut donc faire les mêmes observations.

C. — Qualités de la détermination du paramètre D_H

Le coefficient de dispersion hydrodynamique D_H étant le seul paramètre phénoménologique utilisé ici, il nous importe de connaître les qualités de sa détermination par ajustement.

1) *Unicité de la valeur de D_H déterminée à partir d'une même courbe d'élution observée (pour un même domaine d'ajustement)*

Les trois données ajustées par le programme étant, outre D_H, la porosité ε et la durée de l'impulsion $t_m - t_0$, il est nécessaire que les valeurs de ces paramètres obtenues par ajustement du modèle à une même courbe d'élution observée soient uniques quelles que soient les valeurs D_H, ε et $t_m - t_0$ entrées comme données.

Ceci est bien vérifié, à condition toutefois que l'ajustement puisse s'effectuer

c'est-à-dire si les valeurs entrées comme données ne sont pas trop différentes de leur valeur « réelle » (obtenue par ajustement). Les écarts maximaux tolérables, tels que nous les avons toujours observés, sont de l'ordre de $\pm$ 500 p. 100 pour D_H, de $\pm$ 200 p. 100 pour $t_m - t_0$ (ces deux paramètres affectant surtout la forme de la courbe et peu sa position), et de $\pm$ 20 p. 100 pour ε (qui affecte la position de la courbe par son action sur $\bar{v}$). Ces conditions ne sont donc pas particulièrement contraignantes.

2) *Choix du domaine d'ajustement*

Il est important de choisir correctement ceux des points expérimentaux sur lesquels on effectue l'ajustement. Le domaine délimité par l et n doit comprendre :

— le domaine du pic d'élution, c'est-à-dire les points i pour lesquels $C_{mes}(t_i)$ est supérieur à C_0 à la précision des mesures près ; soit p le nombre de ces points ;

— une partie du « fond », où $C_{mes}(t) = C_0$.

Ce qui a été dit au paragraphe précédent reste vrai quels que soient l et n, à condition que le domaine du pic d'élution soit bien compris dans le domaine ainsi défini et que l'on ait :

$$n - l \geqslant 2\ p.$$

Lorsque cette relation n'est pas satisfaite, on observe que la valeur déterminée par ajustement pour D_H tend à augmenter, les « pieds » du pic d'élution se trouvant moins bien ajustés. Par exemple, dans une certaine expérience où le pic d'élution est sorti entre $i = 41$ et $i = 56$ ($p = 15$), on a trouvé pour $n - l = 30$: $D_H = 1{,}01\ 10^{-4}\ cm^2\ s^{-1}$ et pour $n - l = 15$: $D_H = 1{,}06\ 10^{-4}\ cm^2\ s^{-1}$.

3) *Répétition d'une expérience dans les mêmes conditions expérimentales*

La précision de la détermination de D_H est estimée par l'écart type des valeurs obtenues par répétition d'une certaine expérience, donc pour les mêmes conditions expérimentales (même débit, même durée d'impulsion, même milieu poreux). Les erreurs sur D_H résultent des erreurs sur les données de l'ajustement :

— erreurs de mesure sur les concentrations $C_{mes}(t_i)$;

— erreurs expérimentales, rendant inexacte l'hypothèse que les paramètres expérimentaux sont les mêmes pour toutes les expériences (durée des purges variable, débit Q non rigoureusement reproductible, non reproductibilité du milieu poreux).

La figure 4 donne par exemple les valeurs de D_H obtenues en répétant cinq fois la confection d'une colonne avec un même matériau, et en répétant deux fois l'expérience choisie sur chaque colonne, les courbes d'élution utilisées dans les calculs étant ou non corrigées en fonction de l'expérience de l'« impulsion nulle ». Les paramètres expérimentaux correspondant à l'expérience choisie sont : matériau = sable quartzeux, $\varepsilon = 0{,}40$ à $0{,}42$ selon la colonne, $C_0 = 0$, $C_e = 5\ \mu g\ cm^{-3}$, $\Delta v = 5{,}6\ cm^3$, $\Delta t = 100$ s, $t_m - t_0 = 500$ s, soluté : atrazine.

L'analyse statistique des résultats (tableau 1) montre que l'écart type global est de l'ordre de 1 p. 100 de D_H. Cette reproductibilité des résultats est donc excellente surtout si l'on tient compte du fait que les cinq milieux reconstitués dans la colonne ont des porosités variant de 0,404 à 0,424 et ne sont donc pas tout à fait identiques.

On peut conclure déjà que la méthode exposée dans cet article donne, sur le plan

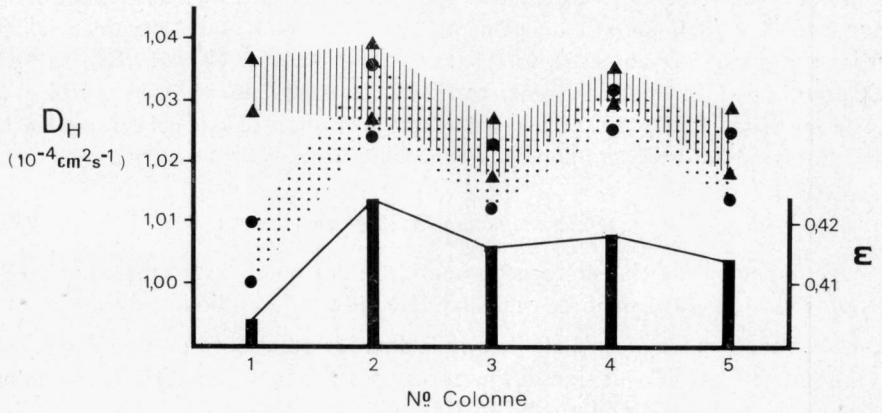


FIG. 4. — *Valeurs de D_H obtenues dans les mêmes conditions expérimentales :*

▲ valeur obtenue à partir d'une courbe d'élution brute ;
● valeur obtenue à partir d'une courbe d'élution corrigée (voir le texte).

Values of D_H obtained in the same experimental conditions :

▲ value obtained from a rough breakthrough curve ;
● value obtained from a corrected breakthrough curve (see text).

TABLEAU 1

Analyse statistique des valeurs de D_H obtenues dans les mêmes conditions expérimentales
(D_H en 10^{-4} cm^2 s^{-1})

Statistical analysis of D_H values obtained in the same experimental conditions

	Courbes d'élution brutes	Courbes d'élution corrigées
Moyenne de D_H	1,028	1,020
Ecart-type global	0,007	0,011
Variance globale	0,000 492	0,001 046
Variance inter-colonnes	0,000 128	0,000 409
Variance résiduelle	0,000 237	0,000 229
Ecart-type résiduel	0,006	0,006

de la précision, des résultats nettement meilleurs que les méthodes dont nous avions parlé dans un précédent article (Le Renard *et al.*, 1977) où, pour des conditions expérimentales comparables aux présentes, on observait une dispersion des résultats autour de leur moyenne de $\pm$ 15 p. 100 au moins. Ce progrès ne peut s'expliquer que par les précautions prises dans le montage présenté en première partie (Le Renard, 1977, pp. 655-656) pour obtenir un débit stable et constant au travers de la colonne durant toute l'expérience (présence d'un volume d'expansion pour filtrer les variations péristaltiques de débit ; stabilité de la vitesse de rotation de la pompe qui n'est jamais arrêtée en cours d'expérience).

Les deux types de courbes d'élution utilisées ici (brutes ou corrigées) ne montrent pas de différences significatives quant à la détermination de D_H. La correction a pour résultat de diminuer un peu le coefficient de dispersion hydrodynamique, ce qui

va bien dans le sens attendu, puisqu'elle a pour effet de diminuer la dispersion apparente du soluté, et permet de penser que la valeur déterminée de D_H est plus exacte lorsque l'on effectue la correction de l'« impulsion nulle ».

Sur la figure 4 est également reportée la porosité ε de chacun des milieux poreux reconstitués. On constate que la valeur de D_H déterminée est une fonction croissante de ε ; ceci s'explique par le fait que, pour un matériau donné, la dispersion mécanique D_M croît elle-même avec ε (en fait avec l'étalement du spectre de porosité). On peut en inférer que la précision des mesures serait de l'ordre de 0,6 p. 100 si l'on répétait les mesures sur une même colonne de milieu poreux (valeur calculée à partir de la variance résiduelle, donc une fois exclue la variance attribuable aux variations entre colonnes).

Sur chacune des cinq colonnes précédentes, nous avons également fait une expérience, cette fois avec un débit plus faible ($\Delta t = 1\,000$ s, et $t_m - t_0 = 6\,000$ s). La valeur moyenne de D_H est alors $1{,}333\ 10^{-5}$ cm^2 s^{-1}, et l'écart type de $0{,}006\ 10^{-5}$ cm^2 s^{-1}, soit une précision de l'ordre de 0,5 p. 100.

4) *Validation du modèle : exactitude de la détermination de* D_H

La valeur de D_H, pour une colonne de milieu poreux donnée et un soluté donné, est une fonction de $\bar{v}$ seulement (Perkins et Johnston, 1963). Ceci signifie que la valeur déterminée de D_H ne devrait pas dépendre de la durée $t_m - t_0$ de l'impulsion. La figure 5 montre que ce n'est pas le cas, et que par conséquent le modèle utilisé n'est pas applicable au moins dans certaines parties du domaine de variation de $t_m - t_0$.

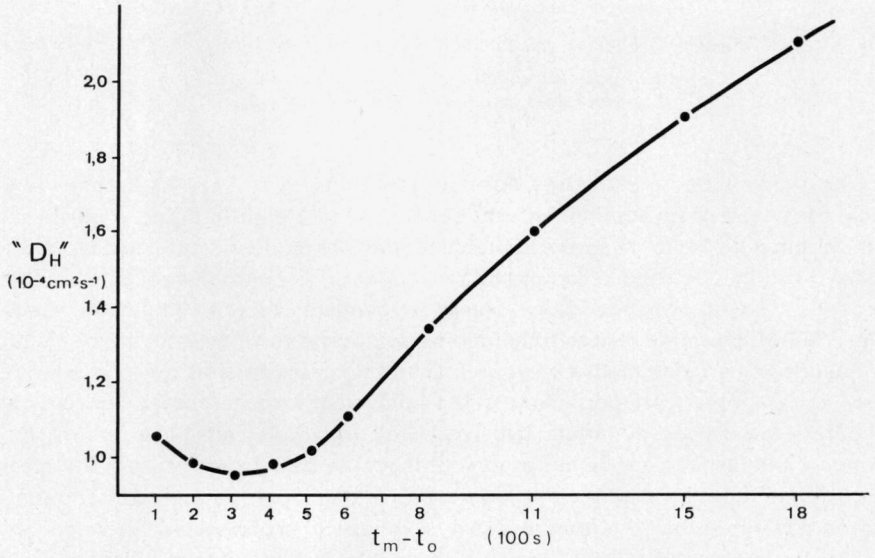


FIG. 5. — *Influence de la durée de l'impulsion sur la détermination de* D_H.
Influence of the impulse lenght on the determination of D_H.

La figure 6 permet d'expliquer que les limites d'applicabilité du modèle soient en fait vite atteintes. Elle représente l'allure des courbes d'élution pour différentes valeurs de $t_m - t_0$ explorées, l'allure cassée du sommet du pic d'élution, ainsi que l'existence

d'une queue en fin de courbe; il y a donc rétention de soluté à l'intérieur de la colonne, due sans doute à l'existence d'une faible fraction d'eau immobile occupant certains pores, cette eau échangeant réversiblement du soluté avec le reste de l'eau circulante ; on pourrait aussi invoquer l'existence d'un phénomène d'adsorption du soluté sur la matrice solide, mais, dans notre cas, des expériences annexes ont prouvé que le sable quartzeux utilisé n'adsorbe pas le soluté.

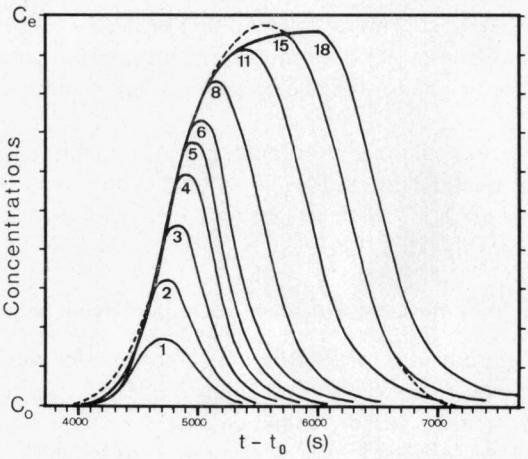


FIG. 6. — *Courbes d'élution pour différentes durées d'impulsion.*

En pointillés, la courbe ajustée pour $t_m - t_0 = 1\ 500$ s.
Les courbes sont repérées par la valeur de $t_m - t_0$ (en 10^2 s).

Breakthrough curve for different impulse lenghts.

Dashed line : curve fitted with $t_m - t_0 = 1\ 500$ s.
The curves relate to different values of $t_m - t_0$ (in 10^2 s).

L'ajustement des paramètres dans le cas où $t_m - t_0 = 1\ 500$ s donne un pic calculé sans cassure au sommet, et sans queues (aussi bien à la fin de la partie ascendante du pic qu'à la fin de sa partie descendante). Le modèle à deux phases utilisé est en effet incapable de rendre compte de phénomènes responsables de queues, comme l'adsorption ou la présence d'une phase supplémentaire (eau immobile, Coats et Smith, 1964). L'ajustement se fait néanmoins, la courbe calculée essayant de s'adapter aux queues par un étalement excessif, ce qui n'est rendu possible que par une surévaluation de D_H (qui n'est plus alors qu'un coefficient apparent). On conçoit que le phénomène d'échange du soluté (ici avec l'eau immobile) affectera l'allure du pic d'élution d'autant plus que le temps durant lequel le soluté sera présent à l'intérieur de la colonne (donc susceptible d'échanges) sera long, donc, pour un débit donné, que la durée de l'impulsion sera longue. Ainsi s'explique la croissance de la valeur déterminée pour D_H quand $t_m - t_0$ croît. Il en résulte que le modèle utilisé est d'autant plus applicable que $t_m - t_0$ est faible, d'où l'intérêt de choisir des durées d'impulsion brèves.

Mais on est limité en ce sens par le fait que lorsque $t_m - t_0$ est faible, le pic d'élution est peu élevé, ce qui introduit une perte de précision au niveau des mesures de concentration $C_{mes}(t_i)$. De plus, pour conserver un nombre de prélèvements d'effluent

(à concentration relative non nulle) suffisant, il faut diminuer le volume de ces prélèvements ce qui n'est pas toujours compatible avec les nécessités des dosages de soluté. De toute façon, on est limité du côté des très faibles valeurs de $t_m - t_0$ par le fait que la durée des purges, même lorsque l'on tente d'en tenir compte par une correction d'« impulsion nulle », constitue un artefact expérimental dont le poids devient excessif (ce qui se traduit par un accroissement de D_H quand $t_m - t_0$ devient trop faible), et par le fait que la précision des calculs devient mauvaise dans ces conditions.

Le domaine de durée de l'impulsion pour lequel le modèle semble le plus exact est donc celui des durées faibles, pour lesquelles la valeur déterminée de D_H devient très peu dépendante de $t_m - t_0$. Disons, pour caractériser ce domaine, que le maximum du pic d'élution observé doit être de l'ordre de 0,3 à 0,45 en concentration relative. L'utilisation de durées d'impulsion plus longues ou plus courtes entraîne une surestimation de D_H qu'il importe donc de corriger.

Ainsi, pour $t_m - t_0 = 500$ s, durée utilisée dans le § C3 pour déterminer la précision des mesures, le pic d'élution atteint une concentration relative de 0,6, et la détermination de D_H est faussée d'au moins 5 p. 100 ; c'est-à-dire que l'exactitude du modèle est alors loin d'atteindre sa précision. Ceci peut n'avoir qu'une importance secondaire, lorsque l'on ne s'intéresse par exemple qu'à l'étude de variations de D_H (comme $D_H = f(\bar{v})$), mais doit être souligné.

D. — Qualités de la détermination du paramètre $t_m - t_0$

Ce paramètre étant sensible à tous les écarts (qu'il intègre) entre les concentrations mesurées et calculées, il ne peut être utilisé pour une estimation valable de la surface du pic d'élution observé que dans le cas où l'ajustement a conduit à un résidu R^2 très faible.

Le paramètre ajusté $t_m - t_0$ est donc, tout comme D_H, sensible à toute non-conformité du modèle utilisé à l'observation. Heureusement il s'agit là d'un paramètre purement expérimental, dont la connaissance précise ne revêt en principe aucun intérêt, malgré son importance dans les calculs.

E. — Conclusions

Nous venons de déterminer les conditions expérimentales pour lesquelles la détermination des paramètres D_H et $\bar{v}$ (donc ε) est la plus exacte possible. Mais il est pratiquement impossible de dire pour autant que le modèle est valide dans ce cas. Il ne faut pas oublier que D_H est un paramètre phénoménologique (« paramètre d'ignorance »), et ne pas être surpris de constater qu'il puisse prendre des valeurs différentes pour une même expérience selon les modèles d'interprétation que l'on s'est donnés.

Il est néanmoins utile de disposer d'une méthode permettant au moins de faire des mesures comparatives précises, et le présent modèle simple à deux phases se montre en ce sens bien adapté.

Rappelons que les facteurs dont dépend ici la précision de la détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique sont surtout :

— la constance du débit au travers de la colonne, donc celle de $\bar{v}$ (d'où les précautions prises au niveau de la conception des circuits d'alimentation : voir première partie) ;

— la qualité des purges du volume mort d'alimentation (dépendant du dessin de l'embout d'alimentation de la colonne et du système de réalisation des purges) ;

— et bien sûr, la précision sur les mesures de concentration de l'effluent (voir l'article précédent déjà signalé, où cet aspect était examiné en détail).

Reçu pour publication en mai 1979.

Remerciements

Je remercie Messieurs Guennelon et Vachaud d'avoir bien voulu relire le manuscrit de cet article et de m'avoir fait part de leurs remarques. En particulier M. Vachaud a attiré mon attention sur l'impossibilité d'utiliser la présente méthode avec des milieux poreux non saturés (même si leur teneur en eau est homogène) ; en effet, le fait d'interrompre le débit en cours d'expérience (existence de débits transitoires), est incompatible avec l'hypothèse de circulation en régime continu.

Summary

Description of a method for determining the coefficient of longitudinal hydrodynamic dispersion, in an homogeneous saturated porous medium

II. — Application of a mathematical model with three parameters, one of which is phenomenological

A method is described in detail for determining the longitudinal hydrodynamic dispersion coefficient, in an homogeneous saturated porous medium. The method allows an overall reproductibility better than 1 p. 100. The first part (Ann. agron. 1977, **28** (6), 651-659) delt with methodological aspects. In this part, the application of a simple mathematical model — one parameter (D_H) model — is studied from the viewpoint of its performances and limitations. In a third part, the use of a three parameter model (a three phases model) will be treated.

Zusammenfassung

Beschreibung einer Methode für die Messung des hydrodynamischen Längsdispersionskoeffizienten in einer wassergesättigten homogen porösen Umgebung

II. — Anwendung einer mathematischen Modells mit drei Parametern davon einem phänomenologischen

Eine Methode für die Bestimmung der hydrodynamischen Längsdispersionskoeffizienten D_H in wassergesättigter, homogener, poröser Umgebung ist ausführlich beschrieben. Sie ermöglicht, eine Wiederholungsfähigkeit höher als 1 p. 100 zu erreichen. Im ersten Teil wurden die Gesichtspunkte der Methodik behandelt (Ann. agron. 1977, 28 (6), 651-659). Im vorliegenden Teil wurde die Anwendung eines einfachen sogenannten einparametrischen (D_H) mathematischen Modells unter dem Gesichtspunkt seiner Leistungen und Grenzen untersucht. In einem dritten Teil wird die Anwendung eines Modells mit drei Parametern (Model mit drei Phasen) behandelt.

РЕЗЮМЕ

Описание метода определения коэффициента продольной гидродинамической дисперсии в гомогенной, насыщенной водою, пористой среде.

II. — Применение математической модели к феноменологическому параметру (двухфазная модель).

ЛЕ РЕНАР Ж.

В данной работе детально описывается методика определения коэффициента продольной гидродинамической дисперсии D_H в гомогенной, насыщенной водою, поистой среде. Воспроизводимость этого метода выше 1 %. В первой части работы (Агрономические Анналы 1977, *28*, (6), 651-659) проводился разбор методологических аспектов. В данной части, применение простой математической модели с одним только параметром (D_H) изучается с точки зрения результатов и ограничений. В третьей части будет обсуждаться применение модели с тремя параметрами (трехфазная модель).

Références bibliographiques

COATS K. H., SMITH B. D., 1964. Dead-end pore volume and dispersion in porous media. *Soc. Petrol. Eng. J.*, **4,** 73-84.

LAPIDUS L., AMUNDSON N. R., 1952. Mathematics of adsorption in beds. VI : The effect of longitudinal diffusion in ion exchange chromatographic columns. *J. Phys. Chem.*, **56,** 984-988.

LE RENARD J. *et al.*, 1977. Mesure du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal dans un milieu poreux saturé. *Ann. agron.*, **28** (1), 47-64.

LE RENARD J., 1977. Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau. I. Aspects méthodologiques. *Ann. agron.* **28** (6), 651-659.

PERKINS T. K., JOHNSTON O. C., 1963. A review of diffusion and dispersion in porous media. *Trans. AIME*, **228,** 70-84.

Ann. agron., 1979, **30** (2), 121-138.

Influence des caractéristiques de particules d'amendements calcaires sur leur solubilité carbonique

Ph. BUSSIÈRES

Station d'Agronomie I. N. R. A., Rue de Stang-Vihan, 29000 Quimper

Résumé

La « solubilité carbonique » (pourcentage de calcaire solubilisé après 2 h dans une solution aqueuse saturée en CO_2) d'amendements calcaires d'origine marine, de granulométrie différente et de « solubilité carbonique » comprise entre 5 et 20 est comparée à un modèle cinétique de dissolution de particules fondé sur l'action de leur surface.

Les particules sont assimilées à des cylindres longs de masse volumique ρ, de rayon initial r_{0i} dans la fraction granulométrique constituant a_i p. 100 de la masse calcaire. La « solubilité carbonique » mesurée est expliquée en grande partie par la « solubilité carbonique » calculée :

$$SC = 100 - \Sigma a_i(1 - kt/r_{0i}\,\rho)^2, \text{ avec } a_i = 0 \text{ si } r_{0i} < kt/\rho\ ,$$

où k est une vitesse de dissolution par unité de surface et de temps et t le temps, égal à 2 h. Le rapport k/ρ est en moyenne égal à 8 mm/mois.

L'auteur tente d'expliquer les écarts subsistant entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées. Il est montré que les facteurs d'explications peuvent être pris en compte, en partie, par l'intermédiaire de la fraction inférieure à 0,5 mm et d'une densité apparente des échantillons remaniés déterminée conventionnellement. Des régressions très significatives reliant ces paramètres à la « solubilité carbonique » mesurée et au rapport k/ρ sont proposées en vue de l'utilisation des calcaires étudiés.

Introduction

Dans un précédent travail (Bussières, 1978) nous avons montré que la dissolution des particules d'amendements calcaires dans un sol acide est fortement liée à leur surface. Cette surface a été estimée en assimilant les particules à des cylindres longs de diamètre initial égal aux dimensions granulométriques. Toutefois, elle n'explique pas entièrement les différences de dissolution observées entre les amendements calcaires qui ont été étudiés.

Nous nous proposons d'examiner sur les mêmes échantillons calcaires, comment les résultats du test de la solubilité carbonique sont liés à la surface des particules et si, éventuellement, d'autres caractéristiques interviennent sur ces résultats. La valeur de la méthode de la solubilité carbonique, pour apprécier l'aptitude d'un calcaire à se dissoudre dans un sol acide, pourra ainsi être ultérieurement mieux précisée.

Matériel et méthodes

1. — *Méthode d'étude de la solubilité carbonique* (S.C.)

La mesure est effectuée avec une prise équivalente à 200 mg de calcaire (Q_0) introduite dans un flacon d'un litre contenant 500 ml d'eau saturée en gaz carbonique à 14 °C. Pendant 2 h, le flacon est agité à 35-40 tours par minute à une température de 20° ± 1 °C. Le bicarbonate formé est dosé par de l'acide sulfurique (virage à pH = 4,4) ; la teneur en CO_2 de la solution est vérifiée dans un essai à blanc (1,6 g/l). Le résultat est alors, si Q_2 est la quantité de calcaire restant après 2 h :

$$SC = \frac{Q_0 - Q_2}{Q_0} \times 100 . \qquad (1)$$

Il est à remarquer que le terme « solubilité », employé ici selon l'usage dans le domaine des amendements calcaires, n'est pas une concentration limite de substance dissoute.

2. — *Caractéristiques des calcaires étudiés*

Les trente-deux échantillons étudiés sont constitués de sédiments biodétritiques calcaires, accumulés sur les fonds marins au large de la Bretagne et découverts par le Centre National pour l'Exploitation des Océans. Les principaux débris calcaires sont des particules de Bryozoaires en bâtonnets, des débris de Mollusques et des plaques de Balanes.

Seule a été considérée la fraction de ces échantillons inférieure à 5 mm. Vingt-six échantillons ont une teneur en calcaire comprise entre 80 et 90 p. 100 (tabl. 1). Le rapport $MgCO_3$/carbonates varie de 2 à 5 p. 100. La granulométrie est très variable. On a distingué les fractions 5/1 mm ; 1/0,5 ; 0,5/0,315 ; 0,315/0,160 mm, de rayon moyen respectif 1,5, 0,375, 0,204 et 0,119 mm. Il n'y a quasiment pas de particules inférieures à 0,160 mm. Nous avons observé que les particules en bâtonnets passaient à travers les tamis de mailles carrées un peu supérieures à leur diamètre. D'après quelques échantillons, dont ceux les moins riches en calcaire, la teneur en calcaire est plus faible dans les fractions les plus fines.

La solubilité carbonique des échantillons entiers (exprimée en pourcentage du calcaire des échantillons) varie de 5 à 18 (le coefficient de corrélation entre les résultats de deux répétitions est égal à 0,91 ; au seuil 0,001, r = 0,55). Celle de différentes fractions, dont certaines concassées, de quatre échantillons varie de 5 à 27. Les formes prédominantes des particules de ces fractions et des trente-deux échantillons ont été notées par une observation visuelle rapide (tabl. 4 et fig. 5).

Une densité apparente conventionnelle des trente-deux échantillons remaniés au laboratoire a été mesurée en plaçant un volume apparent approximatif de 80 à 90 ml d'échantillon dans la partie supérieure d'un appareil à mesurer le poids spécifique de grains de céréales (fig. 1). La partie inférieure a été remplacée par un entonnoir de 10 cm de diamètre, sans douille, l'orifice inférieur étant situé au niveau supérieur d'une éprouvette de 100 ml. Après la chute du calcaire, cette densité apparente, qui varie du simple au double, se déduit du volume et du poids. La corrélation entre les résultats de deux répétitions est de 0,99.

TABLEAU 1

Caractéristiques des échantillons calcaires (< 5 mm)
Characteristics of limestone samples (< 5 mm)

N° Echantillon		p. 100 calcaire	Granulométrie (p. 100). Fractions (mm)				$\frac{MgCO_3 \times 100}{\text{carbonates}}$ (1)	Densité apparente conventionnelle	Solubilité carbonique		
			0,160-0,315	0,315-0,500	0,500-1,000	1,000-5,000			rep. 1	rep. 2	moy.
Armen	147 ...	85	5,4	24,1	52,8	17,8	4,15	1,10	15	13	14,0
	150 ...	89	9,0	30,9	47,9	12,7	3,92	1,00	14	16	15,0
	151 ...	87	4,5	24,1	52,7	18,8	4,25	1,12	11	11	11,0
	152 ...	84	3,6	21,5	57,0	17,5	4,15	1,20	8	9	8,5
	156 ...	89	5,4	25,5	53,3	15,7	3,68	1,03	12	11	11,5
	157 ...	88	2,9	19,9	51,0	26,3	3,72	1,06	11	11	11,0
	160 ...	92	0,0	0,2	16,0	83,6	2,63	0,92	6	4	5,0
	161 ...	92	0,0	5,1	29,7	65,6	2,81	0,80	10	9	9,5
Four	105 ...	89	1,7	19,6	56,5	22,4	3,99	0,87	12	11	11,5
	109 ...	89	19,0	37,0	37,5	6,3	4,62	0,75	18	19	18,5
	110 ...	88	1,5	16,8	61,0	20,5	4,13	0,85	13	11	12,0
	111 ...	86	4,7	25,6	46,7	22,8	4,30	0,83	16	14	15,0
	113 ...	90	2,8	18,1	47,5	31,8	4,11	0,74	16	15	15,5
	118 ...	85	0,4	14,9	68,5	16,4	4,18	0,91	13	11	12,0
	122 ...	87	3,5	17,6	47,2	30,8	4,01	0,96	11	9	10,0
	128 ...	90	0,6	10,0	40,5	48,5	5,11	0,58	16	13	14,5
Gorgegou	8 ...	80	12,9	11,0	10,7	60,4	3,65	1,16	14	9	11,5
	9 ...	88	34,2	17,4	26,1	22,4	3,60	0,98	16	15	15,5
	19 ...	82	22,9	38,6	28,1	10,3	3,56	0,99	17	16	16,5
	210 ...	70	2,9	14,4	56,9	25,8	3,69	1,26	11	11	11,0
	212 ...	72	5,0	27,4	37,0	30,6	2,19	1,18	12	8	10,0
	214 ...	84	16,2	20,0	23,7	39,9	2,95	0,99	12	14	13,0
	216 ...	66	44,6	45,2	9,7	0,3	3,66	1,14	18	18	18,0
	219 ...	88	0,0	0,0	2,1	97,8	1,91	0,99	5	3	4,0
Ouessant	180 ...	84	0,2	8,1	52,5	39,2	3,83	0,87	12	11	11,5
	181 ...	81	0,4	17,4	64,6	18,1	3,71	0,91	11	11	11,0
	186 ...	85	0,0	0,0	16,1	83,5	3,66	0,97	6	5	5,5
	187 ...	86	0,0	5,0	20,1	74,7	3,32	0,94	6	7	6,5
	192 ...	93	0,0	9,4	67,1	23,4	3,82	0,72	12	14	13,0
	194 ...	89	0,0	2,0	21,3	76,5	3,33	0,98	6	6	6,0
	195 ...	90	0,0	0,6	27,7	72,5	4,04	0,80	6	7	6,5
	196 ...	86	0,0	8,8	63,0	28,0	3,74	0,98	8	9	8,5

(1) Les teneurs en carbonates sont obtenues par le calcimètre Bernard et exprimées en $CaCo_3$.

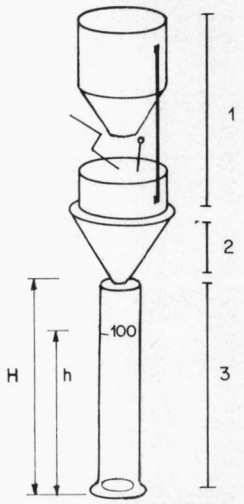


FIG. 1. — *Dispositif de mesure de la densité apparente conventionnelle des échantillons calcaires remaniés.*

1. — Partie supérieure d'un appareil de mesure du poids spécifique de grains de céréales « NILEMA-LITRE » (Tripette et Renaud, Paris).
2. — Entonnoir de grand diamètre égal à 100 mm et dont l'ouverture inférieure a un diamètre égal à 17 mm, la douille ayant été supprimée. La hauteur du tronc du cône est égale à 80 mm.
3. — Eprouvette pyrex de 100 ml (H = 260 mm ; h = 188 mm).

Apparatus for measuring the conventional apparent density of recasted limestone samples.

3. — *Facteurs susceptibles d'expliquer les résultats de la solubilité carbonique des calcaires étudiés*

La solubilité carbonique peut dépendre :

— de la surface de calcaire en dissolution qui est liée à la taille des particules, à leur forme et à leur porosité ;

— du matériau constituant les particules et notamment de la forme cristalline du calcaire que le rapport des teneurs en magnésium et en calcium peut caractériser ;

— des variations de concentrations en CO_2 et en produits formés au cours de l'avancement de la réaction. Il semble, toutefois, que l'avancement de la réaction ne devrait pas avoir beaucoup d'incidence sur la vitesse de dissolution par unité de surface car Mauvisseau et Barbier (1950) ont observé, sur différents calcaires, que la solubilité carbonique d'un mélange de différentes fractions granulométriques de solubilité carbonique différente était la somme des solubilités carboniques de chacune d'elles pondérées par leur importance respective.

4. — *Modèle de dissolution utilisé*

Il suppose la vitesse de dissolution des particules calcaires proportionnelle seulement à la surface S de calcaire telle que : $dQ/dt = -k.S$, où k est une vitesse de dissolution par unité de surface. On peut alors écrire (Bussières, 1978), que la quantité Q de calcaire restant au temps t est liée à la quantité initiale Q_0 par l'une des relations suivantes, selon la forme géométrique des particules :

$$Q = Q_0 \left(1 - \frac{2\,kt}{h_0\,\rho}\right) \quad \text{avec} \quad Q \geqslant 0 \quad \text{soit} \quad t \leqslant \frac{h_0\,\rho}{2\,k},$$

si les particules sont plates, c'est-à-dire ont deux surfaces planes parallèles et grandes par rapport à leur épaisseur h_0, ρ étant la masse volumique.

$$Q = Q_0 \left(1 - \frac{kt}{r_0 \rho}\right)^2 \quad \text{avec} \quad Q \geqslant 0 \quad \text{soit} \quad t \leqslant \frac{r_0 \rho}{k},$$

si les particules sont des cylindres allongés de section de rayon r_0.

$$Q = Q_0 \left(1 - \frac{kt}{r_0 \rho}\right)^3 \quad \text{avec} \quad Q \geqslant 0 \quad \text{soit} \quad t \leqslant \frac{r_0 \rho}{k},$$

si les particules sont des sphères de rayon r_0.

Nous avons constaté que Swartzendruber et Barber (1965) ont modélisé de cette dernière façon la cinétique de dissolution de particules calcaires sphériques de même taille.

Dans le cas d'un mélange de particules de caractéristiques initiales différentes, la quantité de calcaire restant au temps t est la somme des quantités restantes de chaque catégorie. Si l'on considère, par exemple, un mélange, de masse Q_0, de particules cylindriques allongées de même matériau mais de taille différente, $a_i\ Q_0/100$ étant la masse d'une fraction granulométrique constituée de particules ayant pour rayon r_{0i}, la quantité de calcaire restant après 2 h est :

$$Q_2 = \Sigma \frac{a_i Q_0}{100} \left(1 - \frac{kt}{r_{0i} \rho}\right)^2$$

et la solubilité carbonique est selon (1) :

$$SC = 100 - 100 \frac{Q_2}{Q_0} = 100 - \Sigma a_i \left(1 - \frac{kt}{r_{0i} \rho}\right)^2$$

ou

$$SC = 100 - \Sigma a_i + \frac{2\ kt}{\rho} \Sigma a_i / r_{0i} - \frac{k^2 t^2}{\rho^2} \Sigma a_i / r_{0i}^2 \qquad (2)$$

avec $a_i = 0$ si $r_{0i} \leqslant kt/\rho$, où $t = 2$ h.

Résultats et discussion

1. — *Comparaison entre la solubilité carbonique mesurée et celle calculée selon le modèle en supposant les échantillons différant seulement par la granulométrie*

On suppose que la solubilité carbonique des échantillons étudiés dépend seulement de la surface des particules. Dans ces conditions, nous avons montré (Bussières, 1978) que l'influence de la forme des particules sur la cinétique de dissolution est faible, surtout en début de dissolution quand les particules sont des sphères, des cylindres ou des particules plates d'épaisseur sensiblement égale au rayon de ces sphères ou de ces cylindres. Or, pour les échantillons étudiés, des dénombrements et pesées d'échantillons composés surtout de particules plates montrent que l'épaisseur de ces particules est de l'ordre de grandeur du rayon de ces sphères et de ces cylindres, sauf pour les fractions les plus grossières (tabl. 2). En première approxima-

TABLEAU 2

Estimation de l'épaisseur (mm) *de particules de différentes fractions granulométriques d'échantillons composés principalement de particules plates*

Entre parenthèses : nombre de particules comptées et pesées, assimilées à des cylindres de rayon moyen $\bar{r}$ et de densité 2,7. Dans les cas des chiffres en caractères gras, ce sont respectivement les fractions 2,5/1,25 et 1,0/0,630 mm de rayon moyen 0,94 et 0,41 mm qui ont été observées.

Estimation of the thickness (mm) *of particules from various particle-size fractions of samples mainly composed of thin particles*

Fraction (mm)	$\bar{r}$ (mm)	N° Echantillon				
		A 152	G 210	O 187	F 118	G 9
5,0/2,5	1,88	0,68 (136)	0,58 (60)	0,76 (310)		
2,5/1,0	0,88	**0,64** (324)	0,48 (210)	0,75 (400)	**0,32** (300)	**0,46** (300)
1,0/0,5	0,38	**0,51** (510)	0,58 (140)	0,49 (600)	**0,35** (600)	**0,35** (400)
0,5/0,315	0,21	0,29 (620)				

tion, toutes les particules sont donc assimilées à la même forme géométrique et, en particulier, à des cylindres allongés puisque beaucoup d'échantillons contiennent des particules de Bryozoaires en bâtonnet ; d'ailleurs la connaissance du rayon de telles particules en cylindre allongé est accessible par la granulométrie, contrairement à l'épaisseur de particules plates.

Il est alors possible de modéliser la dissolution de tous les échantillons par l'expression (2) pour tester l'influence de la surface.

Ne connaissant pas les valeurs k et ρ, supposées identiques pour tous les échantillons, k/ρ est calculé sur l'ensemble des trente-deux échantillons en résolvant l'équation en k/ρ :

$$\sum_{1}^{32} SC \text{ mesurée} = \sum_{1}^{32} 100 - \sum_{1}^{32} \Sigma a_i \left(1 - \frac{kt}{r_{0i}\,\rho}\right)^2$$

qui s'écrit en supposant que la fraction la plus fine (0,160-0,315 mm) n'est pas encore entièrement dissoute à $t = 2$ h.

$$\sum_{1}^{32} SC \text{ mesurée} = \frac{2\,kt}{\rho} \sum_{1}^{32} \Sigma a_i / r_{0i} - \frac{k^2 t^2}{\rho^2} \sum_{1}^{32} \Sigma a_i / r_{0i}^2$$

avec ici :

$$\sum_{1}^{32} SC \text{ mesurée} = 362{,}5 \; ; \; t = 2 \text{ h} = 0{,}002\,78 \text{ mois} \; ;$$

$$\sum_{1}^{32} \Sigma a_i / r_{0i} = 8\,564 \text{ et } \sum_{1}^{32} \Sigma a_i / r_{0i}^2 = 37\,020.$$

On obtient $k/\rho = 8{,}0$ mm/mois. C'est la plus petite des deux racines de l'équation

qui est retenue, car la fonction SC mesurée en k/ρ passe par un maximum et n'a de sens que dans la région où elle est croissante. Cette valeur k/ρ vérifie que la fraction la plus fine n'est pas entièrement dissoute au bout de 2 h (0,119 mm $>$ $kt/\rho = 0{,}022$ mm).

Pour tester l'influence de la surface, la solubilité carbonique de chaque échantillon a été calculée selon (2) en tenant compte de ses caractéristiques granulométriques, k/ρ étant la valeur mesurée ci-dessus sur l'ensemble des échantillons.

On constate (fig. 2) qu'il existe une régression très significative (au seuil 0,001) entre les valeurs calculées et mesurées :

$$\text{SC mesurée} = b.\text{SC calculée} + c$$

b et c n'étant pas significativement différents de 1 à 0 respectivement.

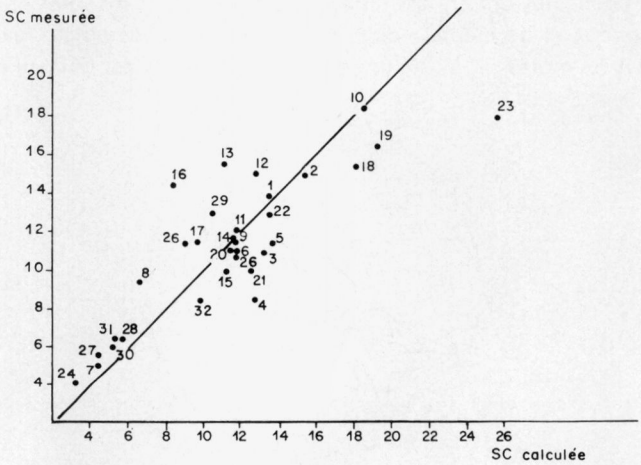


FIG. 2. — *Régression entre la solubilité carbonique calculée selon l'équation* (2) *et la solubilité carbonique mesurée de trente-deux échantillons.* (Les numéros correspondent à l'ordre dans lequel ils sont indiqués au tableau 3).

Regression between the value calculated according to the relation (2) *and the observed value of dissolved limestone* (SC — p. 100 —) *from thirty two samples.*

Le coefficient de corrélation, significatif au seuil 0,001, étant élevé ($r = 0{,}85$), la solubilité carbonique calculée explique 72 p. 100 des variations de la solubilité carbonique mesurée. La surface des particules des échantillons étudiés est donc un facteur important de leur solubilité carbonique.

2. — *Essai d'explication des écarts entre la solubilité carbonique mesurée et celle calculée selon le modèle supposant les échantillons différant seulement par la granulométrie*

La surface des particules prise en compte par le modèle explique une part importante de la solubilité carbonique, mais il subsiste des écarts entre les valeurs mesurée et calculée que nous avons cherché à expliquer.

a) *Phénomènes susceptibles d'expliquer ces écarts.*

Plusieurs approximations ont été faites précédemment.

La teneur en calcaire a été considérée comme identique dans toutes les fractions granulométriques, mais, d'après plusieurs échantillons, elle est inférieure dans les fractions les plus fines. Ce facteur ne peut toutefois expliquer qu'une faible partie des écarts constatés pour ces échantillons.

La vitesse de la réaction, k, a été supposée indépendante de l'avancement de la réaction. Dans le cas où elle lui est liée, elle doit être liée aussi — toutes autres choses étant égales par ailleurs — à l'importance des fractions fines qui déterminent en grande partie la surface initiale du calcaire et donc l'avancement de la réaction.

Toutes les particules de tous les échantillons ont été considérées comme étant constituées du même matériau cristallographique. Or la variation du rapport $MgCO_3$/carbonates indique des différences de matériau entre échantillons. A celles-ci peuvent correspondre des différences de vitesse de dissolution par unité de surface.

Toutes les particules ont été assimilées à des particules modèles en cylindre long de masse homogène et de même masse volumique ρ. Or les particules s'en écartent évidemment plus ou moins : il existe une porosité totale par rapport au modèle (fig. 3)

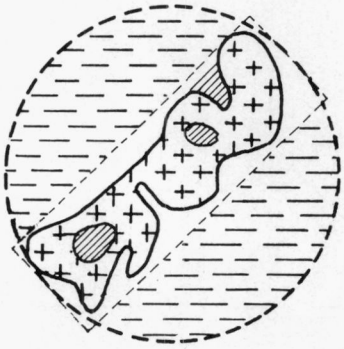
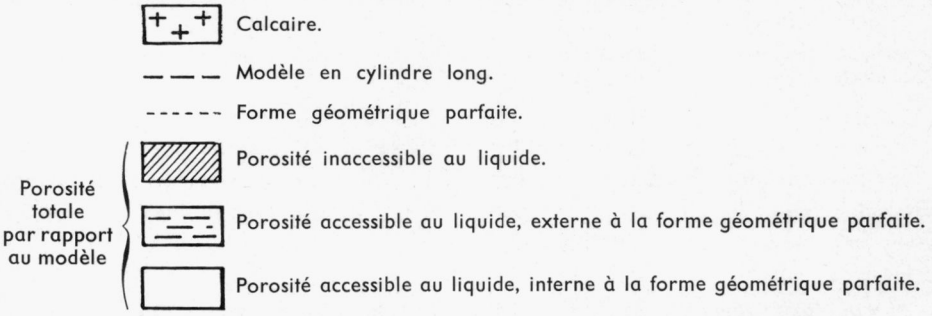


FIG. 3. — *Porosité d'une particule par rapport au modèle* (coupe normale au grand axe de la particule).



Porosity of a particle compared to the used model (normal section to great axis of particle).

qui peut être différente selon les particules. Cette porosité totale est caractérisée par son volume et sa forme. A son volume est liée la masse volumique. A sa forme est liée la surface de dissolution et l'évolution de celle-ci au cours de la dissolution : il en résulte qu'à l'écart entre la forme réelle et la forme en cylindre long est liée une différence entre la vitesse de dissolution par unité de surface réelle et la vitesse de dissolution par unité de surface en cylindre long. Lorsque cette différence n'est pas compen-

sée exactement par la différence entre la masse volumique réelle et la masse volumique des particules modèles en cylindre long, des différences de porosité des particules entre échantillons se traduisent par des différences de rapport k/ρ. Les composantes de cette porosité totale peuvent être précisées : son volume et sa forme résultent des volume et forme des porosités accessible et inaccessible au liquide (1) (fig. 3). On peut alors remarquer que le rapport k/ρ varie dans le même sens que la porosité inaccessible (en d'autres termes : la surface de dissolution d'une masse de particules est liée directement au volume de la porosité inaccessible). Il est, par contre, difficile de préciser, de façon générale, la liaison existant entre k/ρ et le volume et la forme de la porosité accessible (2). Pour mieux cerner la partie de la porosité accessible dépendant de la particule réelle, cette porosité accessible peut être décomposée en porosités accessibles interne et externe à une forme géométrique parfaite des particules (forme simple périphérique des particules réelles : plaque, cylindre, sphère... (fig. 3). On peut alors affirmer que lorsque la porosité accessible interne est répartie dans toutes les dimensions de cette forme géométrique parfaite, le rapport k/ρ dépend de cette forme. Cela permet de souligner l'influence possible sur k/ρ de la forme des particules plates présentes dans les échantillons et contenues surtout dans les fractions grossières.

Finalement, il en résulte que les écarts entre les valeurs mesurée et calculée de la solubilité carbonique peuvent s'expliquer en fonction du rapport k/ρ, spécifique à chaque échantillon, en raison des caractéristiques des particules jouant directement sur ce rapport (rapport $MgCO_3$/carbonates jouant sur k, porosités jouant sur ρ) ou en raison des autres approximations faites, jouant indirectement (forme des particules, teneur en calcaire des fractions fines, vitesse de dissolution peut-être dépendante de l'avancement de la réaction).

Le rapport k/ρ a donc été calculé pour chaque échantillon en identifiant la valeur mesurée de la solubilité carbonique à la valeur attendue par le modèle, compte tenu de sa granulométrie selon la relation (2) (tabl. 3).

b) *Etude des liaisons entre le rapport* k/ρ *et le rapport* $MgCO_3$/carbonates d'une part et entre le rapport k/ρ et la porosité des particules d'autre part.

La corrélation entre le rapport k/ρ et le rapport $MgCO_3$/carbonates étant très faible ($r = 0{,}08$) comme le montre la figure 4, on doit conclure à l'absence de différence de vitesse de dissolution par unité de surface due à ce rapport $MgCO_3$/carbonates ou bien à la variation concomittante d'autres facteurs agissant sur k/ρ.

Pour confirmer les effets des porosités inaccessible et accessible internes à la forme géométrique parfaite des particules appréciée visuellement dans le cas des échantillons étudiés, on peut comparer, pour quelques échantillons de particules concassées ou non, le rapport k/ρ (calculé à partir de leur solubilité carbonique en assimilant les particules à leur forme, plate ou cylindrique, appréciée visuellement, et à partir de leur granulométrie) à des observations visuelles faites sur leur porosité. Le tableau 4 montre que k/ρ est le plus faible pour des échantillons riches en particules de Mollusques, sans porosité, tandis qu'il est élevé pour des échantillons riches en parti-

(1) La porosité initialement inaccessible devenant accessible au cours de la dissolution.

(2) Sans avoir abordé suffisamment de telles mesures dans ce travail pour en tenir compte, il est intéressant de remarquer que les parts respectives des volumes des porosités totale et inaccessible pourraient être évaluées par comptage des particules et mesure de densité au picnomètre en solution aqueuse saturée en CO_2, tandis que les forme et surface de la porosité accessible pourraient être en partie reliées à des « humidités » de rétention.

TABLEAU 3

Estimation du rapport k/ρ. *Solubilité carbonique* (SC) *calculée, soit par le modèle de dissolution,* k/ρ *étant estimé par la régression* (3), *soit par la régression* (4)

Estimation of ratio k/ρ. *Value of dissolved limestone* (SC p. 100) *calculated either by dissolution model,* k/ρ *being estimated by the regression* (3), *or by the regression* (4)

$100-100\left(1-\frac{kt}{r_{0i}\rho}\right)^2$ $t = 2$ h (0,002 8 mois) $\rho = 2,7$	k	15	20	25	30	35	k/ρ calculé selon (2) et la SC mesurée	SC calculée selon (2) avec k/ρ estimé par la régression (3)	SC calculée par la régression (4)
	k/ρ	5,56	7,41	9,26	11,11	12,96			
	r_{0i}								
	0,119	24,3	31,6	38,6	45,1	50,2			
	0,204	14,6	19,2	23,6	28,0	32,2			
	0,375	8,1	10,7	13,2	15,8	18,3			
	1,500	2,0	2,7	3,4	4,1	4,7			

	N° Echantillon	SC mesurée	SC calculée selon (2) avec différentes valeurs de k/ρ							
A	147	14,0		12,5	15,4			8,4	11,8	11,8
	150	15,0		14,2	17,6			7,8	14,2	14,2
	151	11,0	9,2	12,2				6,7	11,4	11,4
	152	8,5	9,0	11,8				5,3	10,3	10,1
	156	11,5	9,7	12,7				6,7	12,8	12,7
	157	11,0		10,9	13,5			7,5	11,1	11,1
	160	5,0		4,0	5,0			9,3	5,5	5,5
	161	9,5		5,9	7,4	8,8	10,2	12,0	8,2	9,7
F	105	11,5		11,0	13,5			7,8	13,1	12,9
	109	18,0		17,3	21,3			8,0	20,3	18,6
	110	12,0		10,8	13,3			8,3	13,3	12,4
	111	15,0		12,0	14,8	17,6		9,4	14,4	14,6
	113	15,5		10,3	12,7	15,1	17,4	11,4	13,7	14,0
	118	12,0		10,8	13,3			8,3	12,9	11,2
	122	10,0	7,8	10,4				7,1	11,6	11,8
	128	14,5		7,8	9,6	11,4	13,2	14,3	11,9	13,5
G	8	11,5		9,0	11,0	13,0		9,7	8,2	10,3
	9	15,5	13,4	17,5				6,5	17,2	15,8
	19	16,5	13,7	17,9				6,8	16,8	16,8
	210	11,0		10,5	12,9			7,8	8,9	8,1
	212	10,0	8,8	11,6				6,3	10,2	10,6
	214	13,0		12,6	15,5			7,7	12,9	13,8
	216	18,0	18,2	23,8				5,5	17,2	17,9
	219	4,0		2,9	3,6	4,3		10,3	3,8	4,1
O	180	11,5		8,3	10,3	12,2		10,4	10,7	10,0
	181	11,0		10,9	13,4			7,5	12,9	11,7
	186	5,5		4,0	5,0	5,9		10,2	5,4	4,3
	187	6,5		5,1	6,4	7,6		9,4	6,5	8,2
	192	13,0		9,6	11,9	14,2		10,1	13,7	11,8
	194	6,0		4,7	5,9	7,0		9,4	6,2	7,0
	195	6,5		5,0	6,3	7,5		9,6	7,4	7,3
	196	8,5	6,9	9,2				6,8	10,8	9,0

cules de Bryozoaires à porosité cellulaire (dont on ne sait si elle est accesssible au liquide ou non). Le fait que k/ρ diminue plus pour ces particules que pour les autres particules lorsqu'elles sont concassées, confirme le rôle de la porosité. Ces effets de la porosité, qui s'expliquent en fin de compte par des différences de surface de dissolution par rapport au modèle confirment donc l'action déjà montrée de la surface des particules sur leur solubilité carbonique.

TABLEAU 4

Solubilité carbonique de fractions de particules brutes ou concassées de quatre échantillons et rapport k/ρ

(k/ρ cyl. si les particules sont assimilées à des cylindres longs ; k/ρ si les particules sont assimilées à une forme plate ou cylindrique selon le type dominant). Mo : particules de Mollusques sans microporosité. Ba : particules de Balanes à microporosités tubulaires (accessibles ?). Bze et Bzb : particules de Bryozoaires de forme encroûtante ou en bâtonnets à microporosités cellulaires (accessibles ?). P : particules plates. D : particules polyédriques.

Observed value of dissolved limestone (SC p. 100) *of some raw or crushed particle-size fractions from fourth samples and ratio* k/ρ

Fractions brutes bi

Rayon moyen	2,5-1,25 mm 0,94				1,0-0,630 mm 0,41				0,5-0,315 mm 0,20				0,315-0,200 mm 0,13			
N° Echantillon	A 152	F 118	F 128	G 9	A 152	F 118	F 128	G 9	A 152	F 118	F 128	G 9	A 152	F 118	F 128	G 9
SC	5,2	6,1	9,6	9,0	6,5	8,4	16,0	10,8	11,9	15,7	17,8	22,2	17,2	14,1	19,7	26,9
k/ρ Cyl.	8,9	10,5	16,6	15,6	4,9	6,3	12,3	8,1	4,5	6,0	6,9	8,7	4,2	3,4	4,8	6,7
Types particules dominants	Mo-Ba	Mo	Bze-Mo	Ba	Mo-Ba	Mo-Bz	Bzb	Ba	P	P-Bz	Bz	P-Bz	D-Bz	Bz-D	D-Bz	Bz-D
assimilés à forme	Plate	Plate	Cyl.	Plate	Plate	Plate	Cyl.	Plate	Cyl.	Cyl.	Cyl.	Cyl.	Cyl.	Cyl.	Cyl.	Cyl.
d'épaisseur (part. plates) mm	0,64	0,32	—	0,46	0,51	0,35	—	0,35	—	—	—	—	—	—	—	—
k/ρ	6,0	3,5	16,6	7,4	6,0	5,3	12,3	6,8	4,4	5,9	6,7	9,0	4,2	3,4	4,8	6,7
Fractions obtenues par concassage de bi																
1-0,630 mm																
SC			10,2													
k/ρ cyl.			7,7													
0,5-0,315 mm																
SC			17,6		11,6	13,5	19,7	14,4								
k/ρ cyl.			6,6		4,3	5,0	7,5	5,4								
0,315-0,200 mm																
SC			16,3		16,6	18,2	26,3	22,9	16,6	18,2	21,6	25,0				
k/ρ cyl.			4,0		4,0	4,4	6,6	5,7	4,0	4,4	5,3	6,2				
Fractions 0,315-0,200 *mm obtenues par concassage de bi à moins de* 0,315 *mm*																
SC	13,8	13,8	20,7	17,6	16,9	17,2	23,8	22,5								
k/ρ cyl.	3,3	3,3	5,1	4,3	4,1	4,2	5,9	5,6								

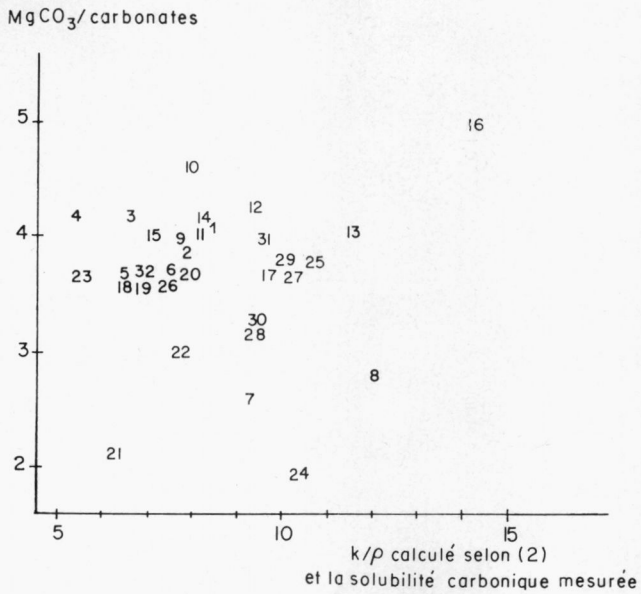


FIG. 4. — k/ρ *et rapport* $MgCO_3$*/carbonates des différents échantillons calcaires.* k/ρ *and ratio* $MgCO_3$*/carbonates of different limestone samples.*

c) *Paramètres liés aux phénomènes expliquant les différences de rapport* k/ρ.

Comme il a déjà été indiqué, plusieurs des approximations faites sont liées à l'importance des fractions granulométriques fines ou grossières (approximation sur la teneur en calcaire des fractions fines, sur la vitesse de dissolution considérée comme indépendante de l'avancement de la réaction, et sur la forme des particules des fractions grossières des échantillons riches en particules plates).

La densité apparente conventionnelle des échantillons est susceptible d'être liée à plusieurs facteurs pouvant expliquer les différences de rapport k/ρ, surtout en début de dissolution, comme c'est le cas ici puisque la solubilité carbonique des échantillons est inférieure à 20. En effet, cette densité apparente conventionnelle dépend, à granulométrie donnée :

— de la partie de la porosité inaccessible au liquide qui est inaccessible aux autres particules lors de la mesure,

— de la forme géométrique parfaite des particules,

— et de la partie de la porosité, interne à cette forme, qui est accessible aux autres particules lors de la mesure : elle dépend des volume et forme des particules qui y accèdent et des forme et volume de la porosité interne accessible au liquide.

Ainsi, la granulométrie et la densité apparente conventionnelle prennent en compte une partie des caractéristiques des particules susceptibles d'expliquer directement ou indirectement les différences de rapport k/ρ.

Sauf compensations exactes entre variations des phénomènes dépendant de ces caractéristiques, à une granulométrie et une densité apparente conventionnelle données doit correspondre un mélange de particules caractérisé par un rapport k/ρ donné.

La figure 5 montre que ces paramètres, la densité apparente conventionnelle et la granulométrie — celle-ci étant considérée par l'importance de la fraction inférieure à 0,5 mm sous la forme de sa racine carrée qui normalise la distribution des valeurs observées — sont capables de regrouper assez bien les échantillons selon des classes constituées par une observation visuelle rapide des principaux types de particules les constituant. Ils permettent donc, aussi, de distinguer les échantillons selon les différents types de phénomènes qui peuvent être causes d'écart entre les solubilités carboniques calculée et mesurée.

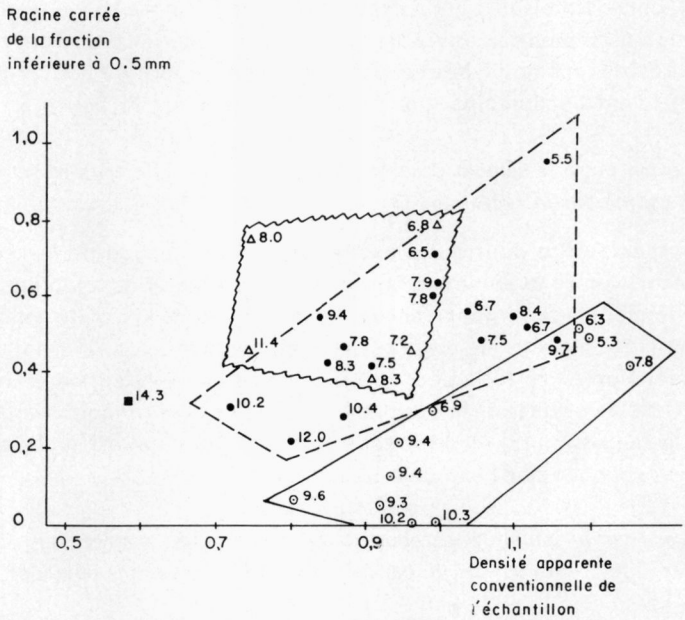


FIG. 5. — *Relations entre* k/ρ, *densité apparente conventionnelle de l'échantillon et fraction inférieure à* 0,5 mm.

Les échantillons sont regroupés selon qu'ils sont composés, d'après une observation visuelle rapide, surtout de particules :

——⊙ plates
— — —● plates et de bryozoaires en bâtonnet
∿∿∿△ de bryozoaires en bâtonnet
■ de bryozoaires à forme encroûtante (1 échantillon).

Relationships between k/ρ, *conventional apparent density of the sample and fraction under* 0,5 mm.

d) *Régression de* k/ρ *selon la granulométrie et la densité apparente conventionnelle des échantillons.*

Puisque ces paramètres peuvent distinguer les échantillons selon l'importance des différents types de particules qui les composent et auxquels correspondent différentes approximations introduites par le modèle, nous avons cherché à savoir si, et comment, le rapport k/ρ leur est lié. La figure 5 montre la tendance suivante : k/ρ est toujours décroissant lorsque, pour une densité apparente conventionnelle (d_a)

donnée, la valeur de la fraction inférieure à 0,5 mm (x p. 100/100) croît et lorsque, pour une valeur donnée de celle-ci, la densité apparente conventionnelle augmente. On peut donc calculer une régression linéaire de k/ρ avec ces deux paramètres. On obtient la régression :

$$k/\rho = -7{,}4\ d_a - 3{,}6 \sqrt{\frac{x\ p.\ 100}{100} < 0{,}5\ mm} + 17{,}1 \qquad (3)$$

dont les coefficients sont significatifs à 0,001. La densité apparente et la fraction inférieure à 0,5 mm, peu corrélées entre elles ($r = 0{,}28$), mais corrélées chacune à k/ρ au seuil 0,001, ont ensemble un taux d'explication de la variance de k/ρ égal à 64 p. 100. Cette régression n'est bien sûr utilisable dans un but d'inférence que pour des échantillons composés des mêmes types de particules que les échantillons étudiés et tels qu'ils appartiennent au domaine que ceux-ci occupent sur la figure 5.

3. — *Comparaison entre la solubilité carbonique mesurée et celle estimée selon le modèle, k/ρ étant estimé par la régression* (3)

Cette comparaison a pour but d'examiner si l'introduction de la régression (3) diminue les écarts entre la solubilité carbonique mesurée et la solubilité carbonique calculée par le modèle seul. Pour chacun des échantillons, k/ρ a été estimé selon (3) et la solubilité carbonique a été estimée avec cette valeur selon (2) (tabl. 3). Le coefficient de corrélation entre ces valeurs ainsi estimées et les valeurs mesurées est égal à 0,93 ; la part de la variance de la solubilité carbonique dont rendent compte ensemble le modèle et la régression (3) est donc égale à 86 p. 100, ce qui est supérieur, au seuil 0,05, à la part expliquée par le modèle seul (72 p. 100).

4. — *Régression de la solubilité carbonique en fonction du pourcentage de particules inférieures à* 0,5 mm *et de la densité apparente conventionnelle des échantillons étudiés.*

Une telle régression peut être utile dans le cas où l'on ne s'intéresse qu'à prédire la solubilité carbonique. La solubilité carbonique des échantillons étudiés paraît assez faible pour qu'il soit possible de négliger l'évolution de la surface des particules. Puisque k/ρ est apparu très corrélé à la densité apparente conventionnelle (d_a) et à la fraction inférieure à 0,5 mm (x p. 100/100) et que la surface initiale calcaire dépend surtout des particules les plus fines, on peut penser que la solubilité carbonique mesurée (SC) est très corrélée à ces deux paramètres. On observe, en effet, la régression significative au seuil 0,001 :

$$SC = 16{,}2 \sqrt{\frac{x\ p.\ 100}{100} < 0{,}5\ mm} - 10{,}1\ d_a + 14{,}1\ . \qquad (4)$$

La fraction inférieure à 0,5 mm et la densité apparente sont corrélées chacune à SC de façon significative au seuil 0,001 et elles ont ensemble un taux d'explication de la variance de la solubilité carbonique mesurée égal à 91 p. 100 puisque le coefficient de corrélation multiple est égal à 0,95. A partir des écarts observés entre les valeurs mesurée et calculée par la régression (4) de la solubilité carbonique, on peut évaluer approximativement le risque de perte de précision si la solubilité d'un des échantillons est prédite par la régression (4) : la valeur calculée ne s'écarte de plus de 20 p. 100

de la valeur mesurée que dans 10 p. 100 des cas ; en aucun cas, elle ne s'en écarte de plus de 30 p. 100.

Le taux d'explication, 91 p. 100, de la solubilité carbonique par ces deux paramètres, un peu supérieur à celui obtenu par le modèle et la régression (3), 86 p. 100, peut surprendre compte tenu de l'approximation faite sur la surface en l'estimant seulement par l'importance de la fraction inférieure à 0,5 mm. Mais, il se révèle que ce paramètre est très lié à l'estimation de la surface initiale faite par le modèle (fig. 6).

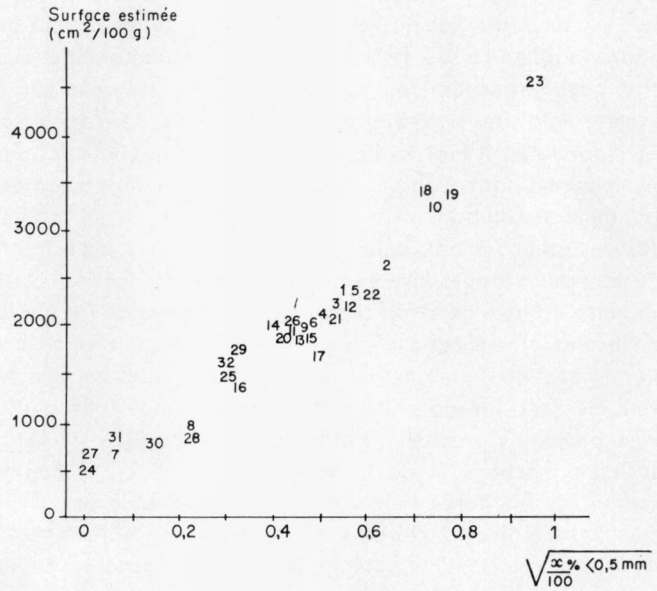


FIG. 6. — *Relation entre la racine carrée de la fraction inférieure à* 0,5 mm *et l'estimation de la surface des particules assimilées à des cylindres longs de masse volumique égale à* 2,7.
Cette surface est calculée comme suit :

- pour une particule : $v = \pi r^2 h \quad s = 2\pi rh = \dfrac{2m}{\rho r}$,
- pour n particules : $S = \dfrac{2nm}{\rho r} = \dfrac{2M}{\rho r}$,
- pour un mélange de fractions granulométriques différentes :

$$S_0 = \Sigma S_i = \frac{2M_0}{\rho} \Sigma a_i/100\ r_i$$

où v est le volume ; s, S et S_0 les surfaces ; h la hauteur d'un cylindre de rayon r_i ; ρ la masse volumique ; m, M, M_0 les masses ; a_i la proportion dans M_0 de la fraction des particules de rayon r_i.

Relationships between the square root of fraction under 0,5 mm *and the estimated surface of the particules assimilated to long cylinders whose volumic mass is* 2,7.

Contrairement à ce dernier, cette régression ne permet pas d'évaluer le rapport k/ρ qu'il peut être utile de connaître pour prévoir l'évolution des particules calcaires dans le sol.

Conclusion

La surface des particules d'un amendement calcaire est un facteur important de sa solubilité carbonique. En effet, la surface des particules des échantillons étudiés, déduite de leur granulométrie (les particules étant assimilées à des cylindres longs de même masse volumique) explique plus de 70 p. 100 de la variation de leur solubilité carbonique. L'action de la surface des particules est confirmée par le fait que la solubilité carbonique est, en outre, liée aux écarts de surface des particules par rapport au modèle en cylindre long, en raison de leur forme et de leurs porosités réelles.

La solubilité carbonique doit en conséquence être mesurée sur les particules telles qu'elles sont employées, c'est-à-dire non concassées, pour tenir compte de leur forme et de leurs porosités. Il faut souligner par ailleurs que la solubilité carbonique de particules hétérogènes dans leur masse et à faible solubilité carbonique ne caractérise que le début de la dissolution.

Dans le cas des amendements calcaires représentés par les échantillons étudiés ici, la solubilité carbonique peut être évaluée de plusieurs façons. Outre sa mesure directe, elle peut être estimée de façon simple par la régression (4) qui la relie à l'importance des particules inférieures à 0,5 mm et à la densité apparente conventionnelle : c'est sans doute, en pratique, une meilleure estimation que la mesure directe car ces paramètres sont mesurés sur des échantillons plus grands. Elle peut être estimée aussi, mais de façon moins précise, à l'aide de la relation (2), de la granulométrie distinguant plusieurs fractions et de la valeur moyenne $k/\rho = 8$ mm/mois. Cette dernière estimation est améliorée si la valeur k/ρ est obtenue par la régression (3). Par rapport à la mesure directe, ces estimations de la solubilité carbonique peuvent présenter l'avantage d'une certaine rapidité puisqu'elles reposent sur des grandeurs assez facilement mesurables sur le « terrain ».

L'intérêt de la méthode de la solubilité carbonique est confirmé puisque la surface des particules d'un amendement calcaire est un facteur important de sa dissolution en sol acide. Cet intérêt est d'autant plus grand que, dans des dispositifs expérimentaux, le rapport k/ρ des échantillons étudiés ici, évalué par l'intermédiaire des variations du pH du sol, est très corrélé à celui observé en solution carbonique, ce qui sera montré plus en détail dans un travail ultérieur.

On peut enfin remarquer qu'il pourrait être intéressant de comparer les résultats obtenus à d'autres méthodes d'appréciation de la solubilité des calcaires, comme par exemple, le dosage du calcaire solubilisé en solution d'oxalate d'ammonium.

Reçu pour publication en mai 1979.

Remerciements

Nous remercions Messieurs M. Coppenet, R. Gras et C. Juste (respectivement, Stations d'agronomie I. N. R. A. de Quimper, Antibes et Bordeaux) qui ont fait bénéficier ce travail de leurs conseils et encouragements, ainsi que Monsieur L. Orsini (Station d'Agronomie I. N. R. A. de Laon) pour les mesures de solubilité carbonique qu'il a bien voulu effectuer.

Nous remercions le Centre National pour l'Exploitation des Océans qui a financé l'étude des échantillons calcaires expérimentés ici en vue de leur emploi comme amendements calcaires.

Summary

Influence of characteristics of limestone particles on their carbonic solubility

The « carbonic solubility » (percentage of solubilized limestone after two hours in an aqueous solution saturated with CO_2) of limestones coming from the sea with a different granulometry and a « carbonic solubility » ranging from 5 to 20 is compared with a kinetic model for particle dissolution based on the action of their surface.

The particles are compared to long cylinders with a voluminal mass ρ, an initial radius r_{oi} in the granulometric fraction making up a_i p. 100 of the calcareous mass. The measured « carbonic solubility » is mostly explained by the calculated « carbonic solubility » :

$SC = 100 - \Sigma\, a_i(1 - kt/r_{oi}\,\rho)^2$ with $a_i = 0$ if $r_{oi} < kt/\rho$ in which k represents a dissolution speed per surface and time unit and t the time equal to 2 hours. The k/ρ ratio is on an average equal to 8 mm/month.

The author tries to explain the deviations subsisting between the measured and the calculated values. It is shown that the explanation factors can be partly taken into account through the fraction inferior to 0,5 mm and an apparent density of the altered samples conventionally determined. Very significant regressions connecting these parameters with the measured « carbonic solubility » and the k/ρ ratio are proposed for the use of the studied limestones.

Zusammenfassung

Einfluss der Eigenschaften von Kalkdüngungsteilchen auf ihre Kohlenstofflöslichkeit

Die « Kohlenstofflöslichkeit » (Prozentsatz von aufgelöstem Kalk nach zwei Stunden in einer CO_2-gesättigter Wasserlösung) vom Meer herstammender Kalkdüngung, mit verschiedener Korngrösse und einer « Kohlenstofflöslichkeit » zwischen 5 und 20 wird mit verglichen einem auf die Wirkung ihrer Fläche begründeten Teilchenlösungsmodell.

Die Teilchen werden mit langen Zylindern mit einem Volumenmasse ρ, einem Anfangsradius r_{oi} in dem granulometrischen Bodenteil, der a_i p. 100 der Kalkmasse ausmacht, verglichen. Die gemessene « Kohlenstofflöslichkeit » ist durch die errechnete « Kohlenstofflöslichkeit » grossenteils erklärt :

$SC = 100 - \Sigma\, a_i(1 - kt/r_{oi}\,\rho)^2$ mit $a_i = 0$ wenn $r_{oi} < kt/\rho$ wo K eine Löslichkeitgeschwindigkeit pro Flächen- und Zeiteinheit ist und t die Zeit, d. h. 2 Stunden. Das K/ρ Verhältnis beträgt im Durchnitt 8 mm/Monat.

Der Verfasser versucht, die zwischen den gemessenen und errechneten Werten beobachteten Abweichungen zu erklären. Es wird gezeigt, dass die Erklärungsfaktoren teilweise mit Hilfe der Fraktion < 0,5 mm und einer herkömmlich bestimmten sichtbaren Dichte der veränderten Proben wiedergegeben sein können. Sehr signifikante Regressionen, die diese Parameter mit der gemessenen « Kohlenstofflöslichkeit » und dem K/ρ Verhältnis verbinden, werden zur für den Verwendung der untersuchten Kalksteine vorgestellt.

РЕЗЮМЕ

Влияние характеристик частиц известковых удобрений на их углекислую растворимость.

БУСЕР Ф.

« Углекислая растворимость »/процент растворимого известняка после 2 часов в водном растворе, насыщённом CO_2/известковых удобрений морского происхождения, разного гранулометрического состава и с « углекислой растворимостью » между 5 и 20 сравняется с кинетической моделью растворимости, основанной на действии их поверхности.

Частицы отождествляются с длинными цилиндрами, плотности ρ, исходного радиуса r_{oi} в гранулометрической фракции составляющей a_i % известковой массы. Измеренная « углекислая растворимость » объясняется отчасти вычисленной « углекислой растворимостью » :

$$SC = 100 - \Sigma a_i\,(1 - kt/r_{oi}\,\rho)^2,$$

где $a_i = 0$ $a_i = 0$ если $r_{oi} < kt/\rho$,

к = скорость растворимости на единицу поверхности и времени,
t = время, 2 часа. В среднем, соотношение к/ρ = 8 мм/месяц.

Автор пытается объяснить отклонения между измеренными и вычисленными значениями. Он показывает, что доля ниже 0,5 мм и условно определённая видимая плотность переработанных образцов частично объясняют явление. Значительные регрессии, которые связывают эти параметры с измеренной « углекислой растворимостью » и с соотношением к/ρ предлагаются для употребления исследованных известняков.

Références bibliographiques

BONDORFF K. A., 1974. Dissolution velocity of lime varieties. *Tidsskrift for planteavl*, **78** (3), 347-352.

BUSSIÈRES Ph., 1978. Loi de variation du pH d'un sol acide après apport de particules calcaires de caractéristiques différentes. *Ann. agron.*, **29** (6), 559-581.

MAUVISSEAU M. J., BARBIER G., 1950. A propos de la normalisation des amendements calcaires. *C. R. Acad. Agric. fr.*, 113-116.

SWARTZENDRUBER D., BARBER S. A., 1965. Dissolution of limestones particles in soil. *Soil Sci.*, **100** (4), 287-291.

Ann. agron., 1979, **30** (2), 139-151.

Le laboratoire $C_2$3A. Un outil au service de la physiologie de la plante entière

I. — Les chambres de culture et les systèmes de mesures associés

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, D. MASSIMINO, J. P. VIVOLI
et Christiane RICHAUD

Département de Biologie, Service de Radioagronomie,
CEN de Cadarache BP nº 1, 13115 Saint-Paul-lez-Durance, France

Résumé

Le laboratoire $C_2$3A (Chambres de Culture Automatiques en Atmosphères Artificielles) est décrit dans son principe et ses différentes composantes : chambres de croissance étanches avec régulations quantifiées en CO_2 et H_2O, mesures des paramètres climatiques et des teneurs en CO_2 — spectromètre de masse quadrupolaire analysant en ligne les atmosphères des parties aériennes et racinaires pour des mesures quantitatives ou isotopiques — équipement d'analyse chimique automatique. Un exemple est donné de la qualité des mesures sur les différents équipements avec un aperçu des objectifs méthodologiques poursuivis.

Introduction

Pour étudier l'action des paramètres de l'environnement (lumière, chaleur, humidité, nature du sol...) sur le développement et la croissance des végétaux, les physiologistes ont conçu, dès les années 50, des laboratoires spécialisés : les phytotrons. Ces laboratoires offrent la possibilité de soumettre les plantes aux conditions climatiques moyennes des différentes saisons, ou régions du globe, de façon reproductible et stable. Ils sont utilisés de façon extensive : les expériences sont nombreuses, les informations étant le plus souvent obtenues par des méthodes destructives (pesées, analyses chimiques, biochimiques, histochimiques). L'étude de l'évolution d'un phénomène exigeant le sacrifice successif de lots différents, plusieurs traitements peuvent conduire à la mise en culture de très nombreuses plantes. Il s'agit le plus souvent de jeunes plantes plus faciles à obtenir en grand nombre, ce qui tend à privilégier les études sur plantules, au détriment des processus de fructification par exemple. Une démarche complémentaire consiste à considérer la plante entière comme un ensemble de fonctions complexes dont on analyse les interrelations par l'étude minutieuse des échanges (CO_2-O_2-eau, sel minéraux, excrétions...) avec le milieu ambiant. Cette approche non destructive, ébauchée dès l'origine de la physiologie végétale, a été relancée par l'apparition d'instruments nouveaux, en particulier l'analyseur de CO_2 par infrarouge et l'emploi des isotopes (Kramer, 1973). Actuellement, un nouveau développement peut être envisagé avec les possibilités instrumentales modernes décuplées par l'automatique et l'informatique dont seules les recherches physiques et biomédicales ont réellement bénéficié jusqu'ici.

Principe

C'est dans cet esprit et avec ces perspectives qu'un dispositif de Chambres de Culture Automatiques en Atmosphères Artificielles a été développé ces dernières années par le Service de Radioagronomie du CEA sous le nom de $C_2$3A. La méthode mise en œuvre (Guérin de Montgareuil *et al.*, 1971) consiste à contrôler et, si nécessaire, réguler de façon quantifiée — au fur et à mesure de leur intervention dans un problème de recherche donné — le plus grand nombre possible de paramètres qui gouvernent la croissance des végétaux supérieurs. Il en résulte, par le biais des bilans entrée-sortie (établis selon le cas sur des pas de temps très courts ou, au contraire, sur toute la vie d'une même plante), la connaissance simultanée, au plan cinétique et quantitatif, d'activités métaboliques généralement étudiées indépendamment et sur des

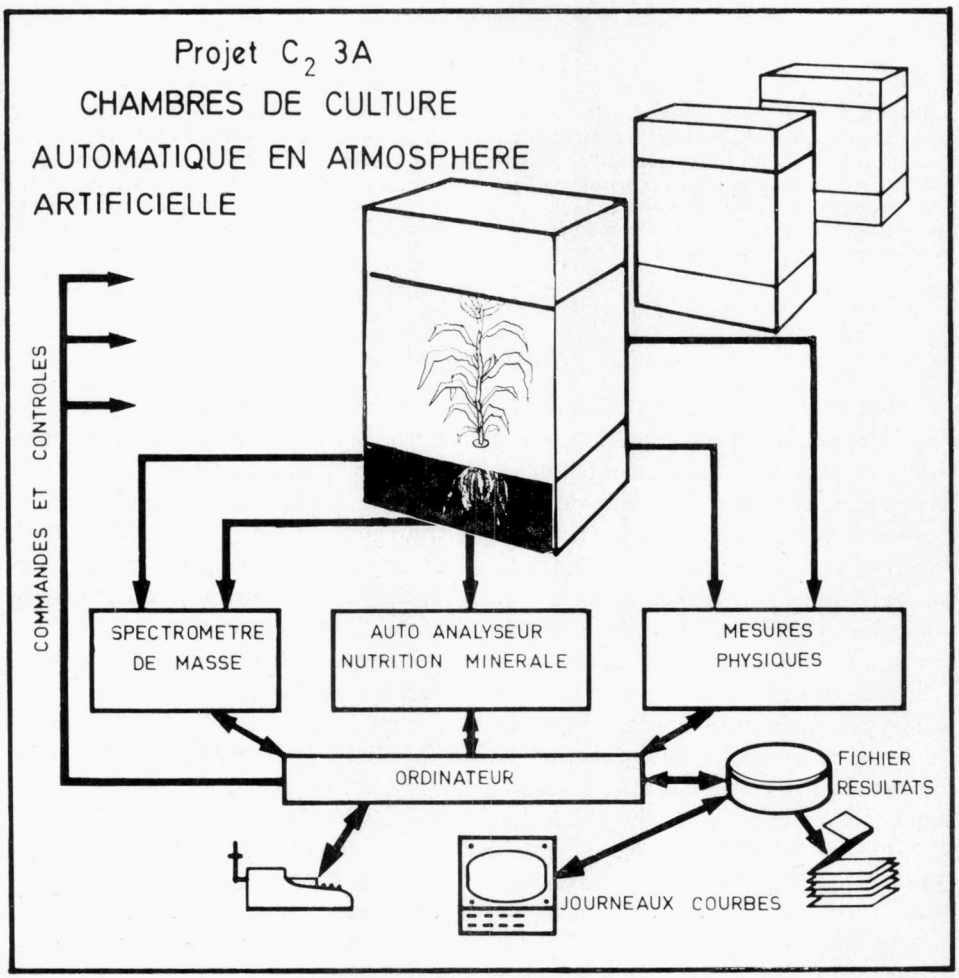


FIG. 1. — *Schéma général du projet.*
General diagram of the $C_2$3A *laboratory.*

végétaux différents. L'utilisation des indicateurs nucléaires permet de compléter les bilans globaux, en précisant ce que reçoit la plante et ce qu'elle restitue

L'ensemble du dispositif expérimental, opérationnel depuis plusieurs années, est schématisé sur la figure 1. La présente publication a pour objet de décrire les chambres de culture et les équipements associés : spectromètres de masse, analyse chimique automatique. Une autre publication sera consacrée au système informatique et à des exemples de résultats obtenus.

Instrumentation. Chambres de cultures étanches

Les chambres $C_2$3A sont conçues sous forme de modules juxtaposables, définissant un milieu physique proche des conditions naturelles en ce qui concerne le climat, particulièrement la quantité et la qualité de l'éclairement (fig. 2). Leur principe et

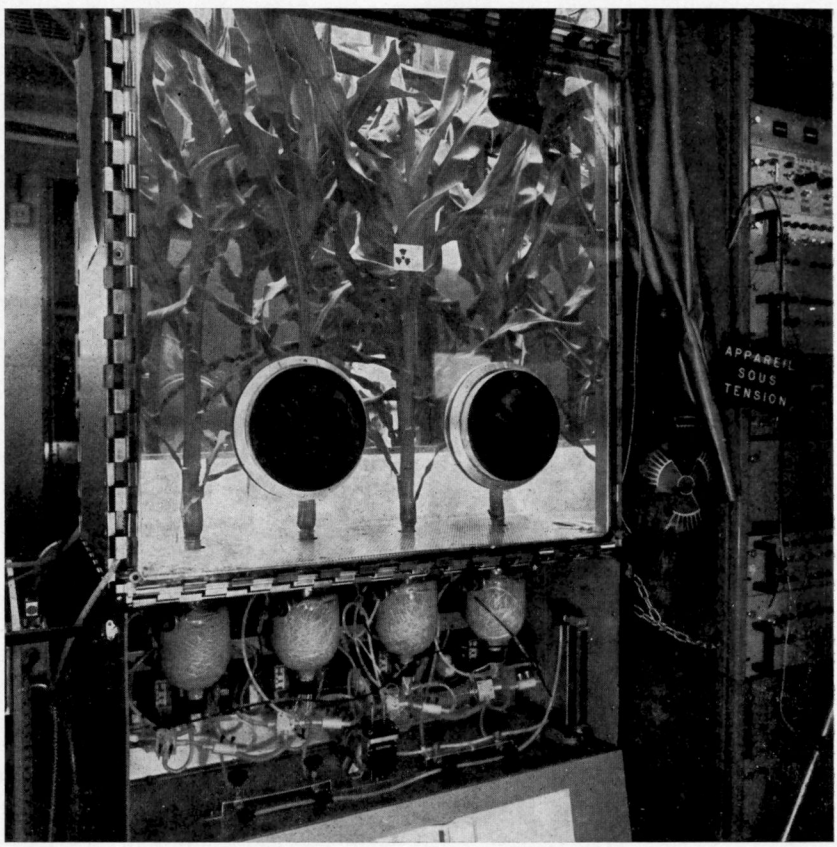


FIG. 2. — *Vue générale des Chambres $C_2$3A à deux modules superposés pour les parties aériennes, consacrées à l'étude du maïs. On note le module racinaire ouvert, la bouteille contenant le mélange d'alimentation en CO_2 et la baie de commande électronique.*

View of the $C_2$3A growth chamber with two overlayed modules, used for studies of Maize. Notice the roots compartment (open), the cylinder containing the gas mixture for CO_2 supply and the electronic board.

leurs premières performances ont été décrites précédemment (André *et al.*, 1974). Les seules modifications apportées concernent l'amélioration de l'éclairement, la localisation des échangeurs-climatiseurs dans des faces fonctionnelles amovibles et la réalisation d'une version miniaturisée (volume 4 à 40 l). Ces points feront l'objet de publications particulières.

L'étanchéité autorise l'emploi de traceurs radioactifs ou stables ($^{14}CO_2$-$^{18}O_2$) mais plus généralement donne un moyen de connaître à une échelle de temps réduite la vitesse des échanges de CO_2 et d'eau qui sont le véritable pouls de la vie végétale.

L'originalité, par rapport aux très nombreuses expériences utilisant des chambres d'assimilation, est de quantifier les régulations (de CO_2 et d'eau) par une méthode incrémentale : un état stationnaire prévu (teneur en CO_2, niveau de solution) est maintenu à une valeur de consigne par adjonction (ou prise) de quantités discrètes — ou pulses — qu'il suffit de comptabiliser à une échelle de temps variable (minute, heure, jour, mois) pour avoir les vitesses ou les bilans correspondants. L'avantage est de réaliser un dépouillement simple et immédiat si on utilise des compteurs électromécaniques locaux. Mais surtout, ce système se prête admirablement à la gestion par mini-ordinateur : ordres simples sous forme de « top » — compte rendu par comptages numériques clairs et précis. De plus, la dynamique du système de mesure est très grande : c'est le même dispositif qui mesure l'assimilation de la plantule et celle de la plante adulte (facteur $> 10^3$) et qui donne le bilan d'assimilation final (facteur de l'ordre de 10^5), le tout sans changement de gamme ou de calibre. La précision des mesures *relatives* peut être très grande. Dans certains cas (photosynthèse) elle peut être indépendante de la précision de l'appareil de mesure du CO_2 pourvu qu'il soit stable ou fidèle.

Milieu racinaire

Comme les autres faces, la base de la chambre est amovible et un module racinaire peut s'adapter. Il est conçu en fonction de la nature des recherches et des buts de l'expérience. Par exemple pour une expérience d'hydrologie (Moutonnet et Couchat, 1978), il s'agit de colonnes de sol dont on peut suivre la teneur en eau par différentes méthodes. Plus généralement, les cultures sont conduites en milieu liquide (fig. 2) (Massimino *et al.*, 1975) ce qui permet de mesurer la respiration racinaire et la nutrition minérale, l'excrétion racinaire et le volume des racines (André *et al.*, 1978*a* et *b*).

Systèmes de mesures associés

Une chambre $C_2$3A peut être utilisée isolément avec un système local de régulation quantifiée en CO_2 donnant photosynthèse et respiration. L'eau condensée donne une mesure journalière de transpiration. C'est le cas de l'expérience citée plus haut (Moutonnet et Couchat, 1978) mais la particularité du dispositif mis en œuvre au laboratoire est double :

— associer simultanément plusieurs chambres (six actuellement) à un équipement de mesures spécialisées : analyseur de CO_2, spectromètre de masse, analyse chimique automatique ;

— assurer la gestion de l'ensemble ainsi défini — chambres et systèmes de mesures — par un mini-ordinateur.

Précisons cependant que, dans ce système, les mesures ou les analyses affectées à une chambre $C_2$3A sont généralement discontinues, réalisées à une fréquence définie (de vingt à une fois à l'heure) pour chaque chambre dans un « tableau de scrutations », dont le pas de temps est de 36 s (1/100 h).

Analyses de CO_2

Un analyseur par infrarouge est utilisé dans le domaine 0-1 000 µl/l principalement pour la régulation quantifiée de la teneur dans les compartiments aériens des chambres. L'échantillonnage du gaz à analyser se fait par détente dans la chambre de l'analyseur normalement sous vide (fig. 3). La séquence arrêt du vide-détente est réalisée avec des électro-vannes. Une analyse (ou scrutation) dure 36 s (détente équilibrage 12 s, vide 24 s) et la consommation de gaz est de 50 ml par analyse. Ceci est un inconvénient grave pour les petites chambres, mais les avantages de ce système sont multiples :

— Il évite le mélange entre les différentes atmosphères, inévitable avec un système classique de commutation. Ceci est important dans les cas d'emploi de $^{14}CO_2$, de basses concentrations en O_2, de polluants atmosphériques ou de risques pathologiques.

— Il est simple : une électro-vanne par circuit.

— Il peut être commandé de façon aléatoire (non cyclique).

— Il est moins sensible au débit des pompes d'analyses.

Analyses au spectromètre de masse

L'appareil utilisé est un spectromètre de masse quadrupolaire Riber* en service depuis 1969. Le système précédemment décrit (André *et al.* 1972) a été modifié sur deux points : l'échantillonnage des gaz, semblable à celui qui injecte le CO_2 dans les chambres, ne consomme actuellement que 1 ml par analyse (fig. 3). Il est relié à la source du spectromètre de masse sous basse pression, par un piège à eau à 0 °C. La séquence d'analyse (scrutation) dure 36 s (introduction 3, mesure du spectre 9, vide 24) mais n'est pas effectuée plus de 30 fois à l'heure pour éviter une pression résiduelle trop élevée dans l'appareil. Deux sortes d'analyses (quantitatives et isotopiques) sont effectuées.

1. — *Analyses quantitatives*

Il s'agit essentiellement des mesures de concentrations de CO_2 et d'O_2 par lesquelles sont déterminées les respirations racinaires. Pour le CO_2 il faut déduire de la valeur du pic 44 celle que l'on obtient en introduisant un gaz de même teneur en oxygène mais sans CO_2. En effet il est connu que l'oxygène contenu dans le gaz analysé

* 22, bd de l'Hôpital Stell, 92505 Rueil-Malmaison, France.

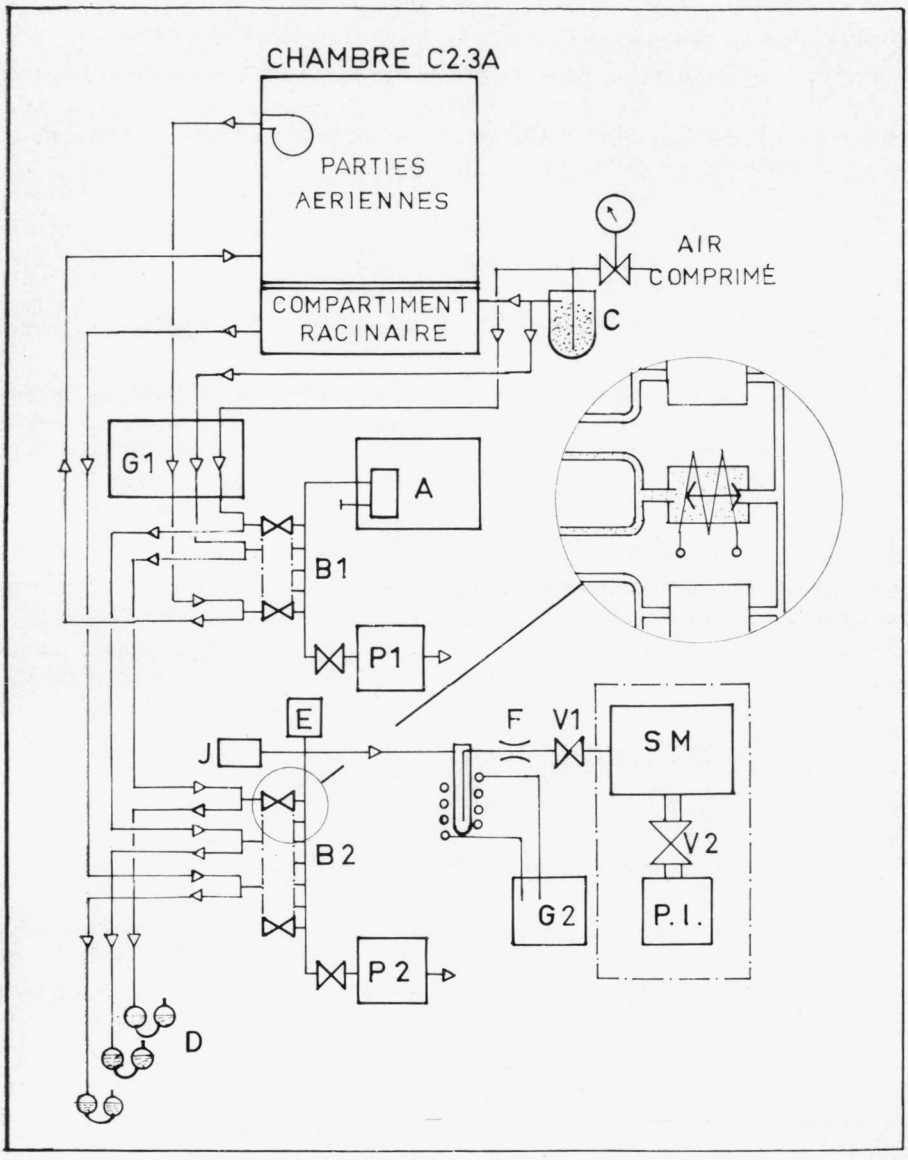


FIG. 3. — *Schéma des circuits et systèmes d'analyse de gaz.*

C Piège à CO_2
G_1 G_2 pièges à eau réfrigérés
A Analyseur par infra rouge
P_1 P_2 pompes à vide primaire
B_1 B_2 batteries d'électrovannes
D Débulleurs à huile
E Expanseur
J Jauge à vide
F Fuite calibrée
V_1 V_2 Vanne de sécurité
PI Pompe ionique
SM spectro. de masse

Diagram of the circuits of gas analysis.

C CO_2 trap
G_1 G_2 cold water trap
A IRGA
P_1 P_2 vacuum pumps
B_1 B_2 Solenoïd valves
D Oil bubbling
E Expension volume
J Vacuum gauge
F Calibrate leak
V_1 V_2 Safety valves
PI Ion pump
S. M. Mass Spectrometer

(cas général) réagit avec les traces de carbone sur le filament de la source et produit du CO_2 qui s'ajoute à celui de l'échantillon. D'une manière générale, le système de traitement des données du mini-ordinateur systématise les possibilités de soustraction de spectres et la consommation d'oxygène par les racines est ainsi obtenue, comme la production de CO_2, par différence entre les teneurs avant et après passage dans le milieu racinaire en système ouvert (fig. 3).

On peut observer les *variations* de teneurs de l'ordre de $2\ 10^{-3}$ dans l'air mesurées avec des précisions de 5 p. 100 et 2 p. 100 respectivement pour l'oxygène et le CO_2. La précision s'améliore si les écarts de teneur sont plus grands. Elle est faible dans le domaine de basses teneurs en CO_2 ($< 500\ \mu l.l^{-1}$) ou l'emploi de l'analyseur I.R. reste privilégié.

2. — *Analyses isotopiques*

Bien que le spectromètre de masse soit déjà un outil remarquable d'analyse quantitative (grande dynamique de concentrations, faible consommation, faible coût unitaire s'il est consacré à plusieurs circuits et/ou plusieurs gaz) il est irremplaçable dans le cas d'études nécessitant l'emploi d'isotopes, ici les isotopes d'intérêt biologique ^{18}O et ^{15}N (fig. 4). La précision obtenue sur un gaz étalon contenant $1\ 10^{-3}$ en $^{18}O_2$ est de l'ordre de 0,2 p. 100 écart standard des 24 moyennes horaires. Elle est meilleure que 0,25 p. 100 mesurée sur les 10 moyennes journalières consécutives.

Actuellement, par une méthode isotopique utilisant l'oxygène 18 et un gaz des référence inerte, le néon, il permet la mesure de la photorespiration pendant plusieurs jours consécutifs, en conditions normales de croissance (André et Gerbaud, 1979 ; Gerbaud et André, 1979).

ARTICLE MOY.HEURE 3 CELLULE CO 8- 4-76 18H 54MN 9S

	VOIE	ETAT	CONSIGNE	COMMANDE	MESURE*	EC.-TYPE	COMMENTAIRE
REG:							Ecart-type relatif
TOR:							
MES:	PI 30	000			+1.07-07	+4.92-10	
	29C 0	000			+3.64-03	+4.47-06	0,12 %
	32C 0	000			+1.92-05	+3.52-06	

FIG. 4. — *Fichier horaire donnant la moyenne et l'écart type des neuf mesures effectuées au spectromètre de masse sur un gaz de référence (azote).*

PI Pression d'introduction au spectromètre de masse en mm Hg.
29C Teneur en ^{15}N mesurée sur le pic 29.
32C Teneur résiduelle en oxygène mesurée sur le pic 32.

Les valeurs mentionnées, par exemple PI, se lisent $1{,}07\ 10^{-7} \pm 4{,}92\ 10^{-10}$.
A noter que seuls les 3 premiers chiffres significatifs sont édités ici. L'écart type étant calculé sur les nombres exacts. L'écart type relatif entre les différentes moyennes horaires de la journée est de 0,20 p. 100.

Hourly journal giving the average and the standard deviation of the nine measurements made by mass spectrometer on the reference gas (nitrogen).

PI Pression in the M. S. in mm Hg.
29C Isotopic content of ^{15}N as measured by 29 line.
32C Residual level of oxygen as measured by 32 line.

Pour conclure la description des chambres $C_2$3A et des systèmes de mesures physiques associées, nous avons choisi la figure 5 qui montre d'abord la précision des régulations climatiques locales de température (TS) et point de rosée (TH) avec les mesures d'éclairement (LU), de température racinaire (TR) et de débit d'aération des racines (DR).

ARTICLE MOY.JOUR 25 CELLULE C5 2- 6-78 Vendredi 140e jour

	VOIE	ETAT	MESURES	EC.TYPE	COMMANDES	CPT +	CPT -
REG:	IP 51	000	+330.000	+8703.000	0.000	+8699.000	0.000
TOR:	JN 5	0 0 1				+15	0
MES:	AC 17	000	+330.564	+5.509-01			
	LU 31	000	+116.733	+2.627			
	TS 32	000	+18.428	+5.846-02			
	TH 33	000	+12.451	+6.681-02			
	DR 34	000	+9.021	+6.037-02			
	TR 7	000	+17.134	+4.005-02			
	TF 10	000	+16.485	+4.299-02			
SPM:	32A 0	000	-2.276-03	+1.219-04			
	44A 0	000	+4.391-03	+1.025-04			

ARTICLE MOY.NUIT 26 CELLULE C5 3- 6-78

	VOIE	ETAT	MESURES	EC.TYPE	COMMANDES	CPT +	CPT -
REG:	IP 51	010	+330.000	+41.000	-3424.000	+40.000	+3449.000
TOR:	JN 5	0 0 1				0	+9
MES:	AC 17	000	+322.256	+7.598			
	LU 31	000	+1.148	+2.939-01			
	TS 32	000	+14.666	+3.224-01			
	TH 33	000	+10.664	+1.462-01			
	DR 34	000	+8.965	+3.906-02			
	TR 7	000	+16.934	+5.687-02			
	TF 10	000	+14.006	+2.303-01			
SPM:	32A 0	000	-2.250-03	+7.423-05			
	44A 0	000	+4.284-03	+1.077-04			

FIG. 5. — *Journal d'une chambre* $C_2$3A *pour le* 140e *jour de croissance d'une culture de* 4 *pieds de maïs.*

Légende. REG. IP. Régulation quantifiée en CO_2 fournissant les comptages des injections de CO_2 (CPT^+) et du piégeage (CPT^-).

TOR-JN. Séquence de commande de la photopériode jour 15 h/nuit 9 h.
MES. Exprime la moyenne des mesures horaires avec leurs écarts-types : AC : teneur en CO_2 en $\mu l.l^{-1}$, LU : éclairement en unités arbitraires, TS : température de l'air en °C, TH : point de rosée en °C, DR : débit d'aération des racines en $l.h^{-1}$, TR : température des racines en °C.
SPM. Analyses quantiatives au spectromètre de masse sur le gaz issu des racines. 32A : appauvrissement en oxygène, 44A : enrichissement en CO_2, exprimés en $l.l^{-1}$ (lire $4{,}28\ 10^{-3} \pm 1{,}07^{-4}$).

Daily journal of the culture of four maize plants at the 140*th of growing day in* $C_2$3A *chamber.*

Legend : REG. IP. Quantified regulation of CO_2 giving the counting of the CO_2 pulses (CPT^+) and the CO_2 trapping (CPT^-).

TOR-JN. Schedule of photoperiod day 15 h/night 9 h.
MES. Gives the hourly average of the measurements with standard deviations : AC : level of CO_2 ($\mu l.l^{-1}$), LU : PAR arb. units, TS : air temperature (°C), TH : dew point (°C), DR : air flow rate through the root system ($l.h^{-1}$), TR : root temperature (°C).
SPM. Quantitative analysis of the mass spectrometer on the gas coming from roots. 32A : oxygen impoverishment, 44A : CO_2 inrichment, expressed in $l.l^{-1}$ (to read $4.28\ 10^{-3} \pm 1.07\ 10^{-4}$).

Sont illustrées ensuite les mesures de CO_2 par infrarouge (AC) sur l'atmosphère des parties aériennes à partir desquelles la régulation quantifiée (REG-IP) fournit des bilans métaboliques sous forme de comptage (CPT^+) pour la photosynthèse et (CPT^-) pour la respiration nocturne.

Enfin, on peut y trouver les résultats de mesures au spectromètre de masse sur le circuit d'aération des racines. Les variations de teneur multipliées par le débit d'aération (DR) donnent les respirations moyennes respectivement en oxygène (32A) et CO_2 (44A) pour les périodes diurne et nocturne. On note à ce sujet la faible différence entre les respirations racinaires de jour et de nuit et le fort quotient respiratoire $\Delta CO_2/\Delta O_2$ qui semble être une caractéristique du maïs en fin de fructification.

Analyse chimique automatique

Une mesure précise et continue de la croissance, par la quantification des échanges de CO_2 dans les chambres, ne peut sérieusement être interprétée si des facteurs limitants inconnus interviennent dans les activités de nutrition des racines.

Après un temps de pratique empirique, nous avons choisi de mesurer systématiquement les bilans nutritifs sur les éléments majeurs (N-P-K-Ca) en nous plaçant délibérément, dans un premier temps, dans des conditions aussi peu limitantes que possible. Il est ensuite plus simple de faire intervenir des contraintes connues suivant les objectifs de recherche poursuivis.

L'équipement utilise des méthodes colorimétriques standard (système technicon) et peut analyser simultanément cinq éléments choisis par un jeu de cassettes analytiques parmi seize disponibles (NO_3, NH_4, P, K, Ca, S, Na, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Cl, B, Mo, pH). Les prélèvements sont faits dans des godets (3 ml) disposés dans un distributeur. Les analyses sont effectuées en temps différé, par exemple sur une série de solutions usagées correspondant à une culture de 30 jours, ou en temps réel pour suivre, sur une plante, une évolution journalière avec une ou plusieurs mesures par heure.

La quantité de solution nécessaire pour une analyse est de l'ordre de 0,5 ml par élément. Les analyses sont faites par comparaison et une séquence comprend toujours une solution étalon, une solution fraîche et une ou plusieurs solutions usées.

Les solutions usées, réparties en godets prêts à analyser et en flacons, sont gardées à — 30 °C au congélateur. Une collection des expériences les plus typiques, notamment après marquage uniforme au ^{14}C, est conservée pour une exploitation concertée ultérieure (micro-éléments, exsudats, hormones etc...).

L'exploitation des mesures consiste à relever l'amplitude des signaux (pics) correspondant à chaque prélèvement d'échantillon, à calculer les concentrations inconnues et, compte tenu des volumes initiaux et éventuellement ajoutés de solution fraîche, à calculer les consommations par la plante dans l'unité choisie.

Le système peut fonctionner soit manuellement avec relevé des mesures sur les pics de l'enregistreur soit sous la conduite totale du mini-ordinateur en temps réel (commande des prélèvements, calcul du retard « chimique » de l'apparition du signal de mesure, acquisition et traitement des mesures). Dans ce cas, les résultats sont imprimés en ligne sur un télétype et stockés en mémoire (disque). La figure 6 illustre la précision du système d'analyse utilisé. Les résultats, dans l'exemple choisi, sortent sur télétype et concernent l'analyse de NH_4^+, NO_3^-, P et K. Cinq éléments peuvent être

01 01-06-78 13-42 ANALYSE TECHNICØN

ART	ECHAN	CØNCENT	CØNSØM!	NH4 !	P04 !	N03 !	K !
	446		446 !	!	!	!	TEMPS !
	546		547 !	!	TEMPS !	!	!
	446		446 !	!	!	!	TEMPS !
	547		547 !	!	TEMPS !	!	!
a)	766		774 !	TEMPS !	!	!	!
	446		447 !	!	!	!	TEMPS !
	547		547 !	!	TEMPS !	!	!
	774		774 !	TEMPS !	!	!	!
	04.127	05.128	00.233!	!	!	!	ETALØN!
	03.026	00.645	00.311!	!	ETALØN!	!	!
	774		774 !	TEMPS !	!	!	!
	04.162	05.171	00.234!	!	!	!	ETALØN!
	03.011	00.641	00.311!	!	ETALØN!	!	!
	1270		1263!	!	!	TEMPS !	!
b)	03.826	d) 00.714	c)00.272!	ETALØN!	!	!	!
	04.165	05.153	00.234!	!	!	!	ETALØN!
	03.019	00.645	00.308!	!	ETALØN!	!	!
	1263		1263!	!	!	TEMPS !	!
	03.840	00.716	00.269!	ETALØN!	!	!	!
	04.166	05.146	00.235!	!	!	!	ETALØN!
	03.024	00.646	00.312!	!	ETALØN!	!	!
	1263		1264!	!	!	TEMPS !	!
	03.835	00.714	00.270!	ETALØN!	!	!	!
	04.163	05.137	00.237!	!	!	!	ETALØN!
	03.859	07.140	00.508!	!	!	ETALØN!	!

	4-082-0	05.436	!	!	!	!	S.N. !
	03.865	07.092	00.522!	!	!	ETALØN!	!
	4-082-0	00.903	!	!	S.N. !	!	!
	03.824	00.713	00.273!	ETALØN!	!	!	!
%1	5-082-1	00.000	30.399!	!	!	!	15.199!
	03.902	07.173	00.527!	!	!	ETALØN!	!
%1	5-082-1	00.000	05.054!	!	02.527!	!	!
	4-082-0	e) 00.515	!	S.N. !	!	!	!
1	4-082-2	03.946	10.745!	!	!	!	05.372!
	03.906	07.173	00.523!	!	!	ETALØN!	!
1	4-082-2	00.849	00.965!	!	00.482!	!	!
1	5-082-1	f) 00.039	02.701!	01.350!	!	!	!
1	4-082-3	03.848	11.270!	g	!	!	05.635!
	03.592 *	06.589	00.529!	!	!	ETALØN!	!
1	4-082-3	00.724	01.504!	!	00.752!	!	!
1	4-082-2	00.189	01.803!	00.901!	!	!	!

FIG. 6. — *(Voir légende page suivante).*

ainsi analysés et exprimés de cette façon. L'imbrication des résultats est d'abord due à la nécessité de sortie « en ligne », sans mobilisation importante de mémoire vive, et ensuite aux retards chimiques importants et surtout différents pour chaque élément. Le traitement ultérieur sur disque permet des éditions et des courbes très claires mais cette présentation condensée suffit pour un contrôle immédiat des analyses par l'opérateur.

Conclusion

L'association de chambres de culture, de systèmes de mesures physiques et de réaulation quantifiées offre simultanément des possibilités peu souvent réunies :

FIG. 6. — *Analyse minérale de solutions nutritives. Début d'une série de mesures de consommations d'ammonium* (NH_4), *phosphate* (PO_4), *nitrate* (NO_3) *et potassium* (K) *sorties sur télétype.*

Légende (pour NH_4 pris comme exemple) :

a) Calcul du temps « chimique » entre prélèvement d'échantillons et signal au colorimètre (en s).
b) Valeur du signal en volt et c) valeur de la ligne de base.
d) Concentration apparente de l'étalon.
e) Concentration de la solution neuve.
f) Concentration de la solution usée.
g) Consommation calculée en millimole par jour.

La stabilité des analyses est donnée par les écarts types sur les moyennes de 10 mesures sur les étalons :

$[NH_4] = 0{,}714 \pm 0{,}001$, $[PO_4] = 0{,}644 \pm 0{,}002$, $[NO_3] = 7{,}163 \pm 0{,}040$, $[K] = 5{,}146 \pm 0{,}023$.

Mineral analysis of the nutrients solutions. Beginning of measurements series concerning amonium (NH_4), *phosphate* (PO_4), *nitrate* (NO_3) *and potassium* (K) *issued on the teletype.*

Legend (NH_4 as example) :

a) Chemical time calculated between sampling and maximum of signal on the colorimeter (in s).
b) Value of the signal (volt) for the standard solution.
c) Value of the signal (volt) on the base line.
d) Calculated concentration of the standard.
e) Calculated concentration of the fresh solution.
f) Calculated concentration of the used solution.
g) Consumption calculated in milimole per day.

The quality of the analysis is given by the standard deviation on the average value calculated from 10 measurements of standard solutions, respectively :

$[NH_4] = 0.714 \pm 0.001$, $[PO_4] = 0.644 \pm 0{,}002$, $[NO_3] = 7.163 \pm 0.040$, $[K] = 5.146 \pm 0.023$.

— Quantification systématique des processus, à chaque fois que possible en terme de vitesse. Dans des conditions expérimentales ainsi définies, l'emploi de traceurs isotopiques apporte, si nécessaire, l'information en terme de flux unidirectionnel.

— Synthèse entre des métabolismes souvent analysés indépendamment alors que la plante est un système bouclé complexe qu'il convient aussi d'examiner comme tel.

— Contribution à une liaison plus étroite entre recherche spécialisée, sur organe, organite voire réaction enzymatique, et expérimentation de type agronomique sur plante entière.

Sur le plan technique, la gestion rigoureuse des différents équipements en continu ne pouvait se réaliser sans faire appel aux moyens de contrôle, programmation et numérisation de la mini-informatique déjà éprouvée en conduite de processus industriel, et capable d'offrir aux chercheurs des mesures condensées sous des formes déjà élaborées.

Reçu pour publication en juin 1979.

Remerciements

Nous remercions tous ceux qui ont collaboré à la réalisation de cet ensemble et particulièrement M. Mariaud dont le travail de montage et de réglage des chambres est particulièrement apprécié.

Summary

The $C_2$3A laboratory. A tool for the study of whole plant physiology. I. — The growth chambers and the associated measuring systems

The principle of the $C_2$3A laboratory is defined and its different parts are described : air tight growth chambers — quantitative regulation of CO_2-measurement of the climatic parameters and CO_2 concentration — quadrupolar mass spectrometer in line for quantitative (O_2-CO_2) and isotopic ($^{18}O_2$-^{15}N) analysis of the atmosphere of the stems and roots, system of automatic chemical analysis. An outline of the quality of the measurements is given for each part of the system in the light of the objectives of the method.

Zusammenfassung

Das C_2 3A Laboratorium, ein Werkzeug im Dienst der Physiologie der Gesamtpflanze I. — Die Kulturkammer und die damit verbundenen mess system.

Das C_2 3A Laboratorium wird in seinem Funktionsprinzip und bezüglich seinen verschiedenen Bestandteile beschrieben : wie z. B. dichte Wachstumskammer mit quantitativer Regulierung des CO_2 u. H_2O ; fernen Messung klimatischer Parameter und der CO_2-Gehalte. Es enthält weiterhin die Beschreibung über die Verwendung eines Quadrupolmassenspektrometers, welches gleichzeitig die Atmosphäre der oberirdischen und Wurzelteile quantitativ oder auch auf Isotopen zugammensetzung analysiert, also eine automatische chemische Analyseneinheit darstellt. Es wird ein Beispiel der Qualität der Messungen mit den verschiedenen Einrichtungen und eine Darstellung der angestrebten metho, dologischen Ziele gegeben.

РЕЗЮМЕ

Лаборатория C_2 3A, новый инструмент для физиологии целого растения.
I. — Камеры разведения и объединённые измерительные систеиы.

АНДРЕ М. ДАГЕНЭ А. МАССИМИНО Д. ВИВОЛИ Ж. П. РИШО К.

Описываются принцип и составные части лаборатории C_2 3A/Автоматические Камеры Разведения в Искусственных Атмосферах/ : герметические камеры роста с количественным регулированием CO_2 и H_2O, измерение климатических параметров и содержания CO_2-квадрупольный масс-спектрометр для анализа атмосферы воздушных и корневых частей в цель количественных или изотопных измерений-приборы автоматического химического анализа. Авторы дают пример высокого качества измерений исполненных с помощью разных приборов и представляют обозрение своих методологических целей.

Références bibliographiques

ANDRÉ M., GERBAUD A., 1979. Consommation d'oxygène pendant la photosynthèse chez Zea Mays (à paraître in *C. R. Acad. Sc.* Paris).

ANDRÉ M., MASSIMINO D. et DAGUENET A., 1978*a*. Daily pattern under the life cycle of a Maize Crop. I. — Photosynthesis, Transpiration, Respiration. *Physiol. Plant.*, **43**, 397-403.

ANDRÉ M., MASSIMINO D. et DAGUENET A., 1978*b*. Daily pattern under the life cycle of a Maize crop. II. — Mineral nutrition, root respiration and root excretion. *Physiol. Plant.*, **44**, 197-204.

ANDRÉ M., NERVI J. C. et LESPINAT P. A., 1972. Régulation par échantillonnage à partir d'un spectromètre de masse de cellules de culture en atmosphères artificielles. *Automatique et Informatique Industrielles*, **9**, 27-31.

ANDRÉ M., NERVI J. C., LESPINAT P. A. et MASSIMINO D., 1974. Units for automatic culture in artificial atmosphere « $C_2$3A » project. *Acta. Hortic.*, **39,** 59-70.

GERBAUD A. et ANDRÉ M., 1979. Photosynthesis and photorespiration in whole plant of wheat (à paraître in *Plant Physiol.*).

GUÉRIN DE MONTGAREUIL P., ANDRÉ M. et LESPINAT P. A., 1971. Mesure instantanée des besoins métaboliques des plantes : applications agronomiques et éventuellement spatiales. *Proceeding of Colloquium on space biology*, ESRO, Paris 310-318.

KRAMER P. J., 1973. Some reflections after 40 years in plant physiology. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **24,** 1-24.

MASSIMINO D., DAGUENET A. et ANDRÉ M., 1975. Chambres $C_2$3A. Module de conditionnement et de quantification métabolique (eau, respiration, nutrition minérale). *C. R. du groupe d'études des racines*, t. 2. (J. Gagnaire, Michard, A. Riedacker eds.) C. E. N. Grenoble.

MOUTONNET P., COUCHAT P., 1978. Mesures journalières sur cycle végétatif complet des échanges gazeux : photosynthèse, transpiration, respiration nocturne, relatif à une culture de maïs conduite à maturité sur colonne de sol (à paraître in *Physiol. Plant.*).

Ann. agron., 1979, **30** (2), 153-166.

Le laboratoire $C_2$3A . Un outil au service de la physiologie de la plante entière

II. — Possibilités de la mini-informatique et premiers résultats

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, Jacqueline MASSIMINO
D. MASSIMINO et Christiane RICHAUD

Département de Biologie, Service de Radioagronomie,
CEN Cadarache BP n° 1, 13115 Saint-Paul-lez-Durance, France

Résumé

Un mini ordinateur assure la gestion en temps réel des Chambres de Culture Automatique en Atmosphères Artificielles ($C_2$3A) et des systèmes de mesure associés : spectromètre de masse quadrupolaire et analyse chimique automatique.

Les mesures des différentes expériences sont archivées sur disque et disponibles sous forme brute ou condensée en journaux horaires ou quotidiens. Ils peuvent être visualisés sur écran, édités ou tracés sous forme de résultats élaborés.

Des exemples de résultats sont donnés : mesures horaires de l'atmosphère des racines et de la consommation de K ; bilans journaliers d'une culture de maïs menée à maturité : photosynthèse, transpiration, respiration nocturne, excrétion racinaire, volume et respiration racinaire, consommation de nitrate et potassium. Les applications en cours concernent principalement l'étude de la photorespiration avec $^{18}O_2$ et de son rôle dans l'économie de la plante entière, notamment le métabolisme de l'azote, mais l'équipement mis en place a une vocation multidisciplinaire évidente.

Introduction

La conduite d'expériences en chambres de culture Automatiques en Atmosphères Artificielles ($C_2$3A) pendant de longues périodes — surtout si elle est associée à des systèmes de mesure spécialisés (spectromètre de masse, analyse chimique automatique) (voir première partie : André *et al.*, 1979*a*) — est une source d'informations importantes en qualité et en quantité.

La qualité doit être garantie par une définition rigoureuse des nombreux paramètres qui définissent l'expérience et par un contrôle permanent de leur stabilité mais également par des mesures simultanées sur des témoins (mesures, gaz ou solutions étalons).

La quantité des mesures et des contrôles ne doit cependant pas submerger les

possibilités d'analyse et doit au contraire, par des procédures de condensation (moyennes avec écart type, comptages, lissages, calculs de normalisation et de conversion en valeurs physiques), alléger le travail de l'expérimentation en produisant des documents, courbes, journaux d'expérience concis, précis et objectifs.

Ces besoins sont couverts par les possibilités de l'informatique dont bénéficient aujourd'hui principalement les recherches expérimentales physiques et bio-médicales. On décrit ci-après une application dans le domaine de la physiologie de la plante entière.

Méthode et instrumentation

L'association de chambres de culture à un système de mesure donné peut être réalisée de façons très diverses. Une première solution avait consisté à réaliser une interface électronique « câblée » (non programmable) chargée d'analyser périodiquement au spectromètre de masse les différentes atmosphères des chambres de culture, de réaliser les régulations quantifiées en CO_2 et de numériser les données sur bande perforée (André *et al.*, 1972, 1974). L'expérience nous a montré à la fois les grandes possibilités de l'automatisme mais aussi les limites d'une telle solution : la programmation des mesures était rigide et définitive et ne pouvait ni s'adapter aux besoins de chaque expérience ni évoluer dans le temps ; la gestion des données était très lourde : aucune condensation des mesures stables répétitives, pas de calcul de normalisation, erreurs sur la bande perforée paralysant les programmes d'exploitation sur gros ordinateur ou nécessitant des logiciels de filtrage complexes et couteux d'utilisation. Nous avons retenu dans un deuxième temps la solution mini-ordinateur en regroupant l'ensemble du dispositif dans un laboratoire fonctionnel décrit par la figure 1, dont la mise en place a commencé en 1974 pour se terminer en 1977.

Le mini-ordinateur choisi (modèle T 1600, Télémécanique-Electrique) dispose d'une mémoire vive de 32 k mots de 16 bits, de deux disques à tête fixe de 512 et 1 024 k mots,

---

FIG. 1. — *Vue générale du laboratoire* $C_2$3A.

Hall d'expérimentation : (1) Chambre à deux modules superposés. (2) Chambres jumelles (2 × 2 modules). (3) Chambre à 1 seul module. (4) Chambres pour études d'hydrologie (4 modules) et culture sur colonnes de sol. (5) Alimentation en CO_2. (6) Groupes frigorifiques de production d'eau froide. (7) Réseaux en caniveaux : circuits d'analyse de gaz et de solutions, mesures et commandes du mini-ordinateur. (8) Petit atelier.

Laboratoires spécialisés : (9) Analyse chimique automatique et (10) Stockage d'échantillons en congélateurs. (11) Analyses centralisées de CO_2 et (12) (13) Spectromètre de masse quadrupolaire. (14) Mini-cellules (4 à 40 l). (15) Mini-ordinateur avec (16) baie des disques, lecteur perforateur de ruban et tiroir de reprise en secours.

General view of the $C_2$3A *laboratory.*

Experimental area : (1) Growth chamber with two overlayed modules. (2) Twin chambers (2 + 2 modules). (3) One module chamber. (4) Growth chamber for hydrology studies (4 modules) conducted on soil columns. (5) CO_2 supply. (6) Cooled water supply. (7) Network conduit : circuits of gas and solutions analysis, measures and commands from the mini-computer. (8) Little workshop.

Specialized laboratories : (9) Chemical analysis with (10) Storage of samples in deep-freeze chambers. (11) Centralized analysis of CO_2. (12) (13) Quadrupolar mass spectrometer. (14) Mini-chambers (4 to 40 l). (15) Computer with (16) board of magnetic disks, tape reader, tape puncher and rack of emergency commands.

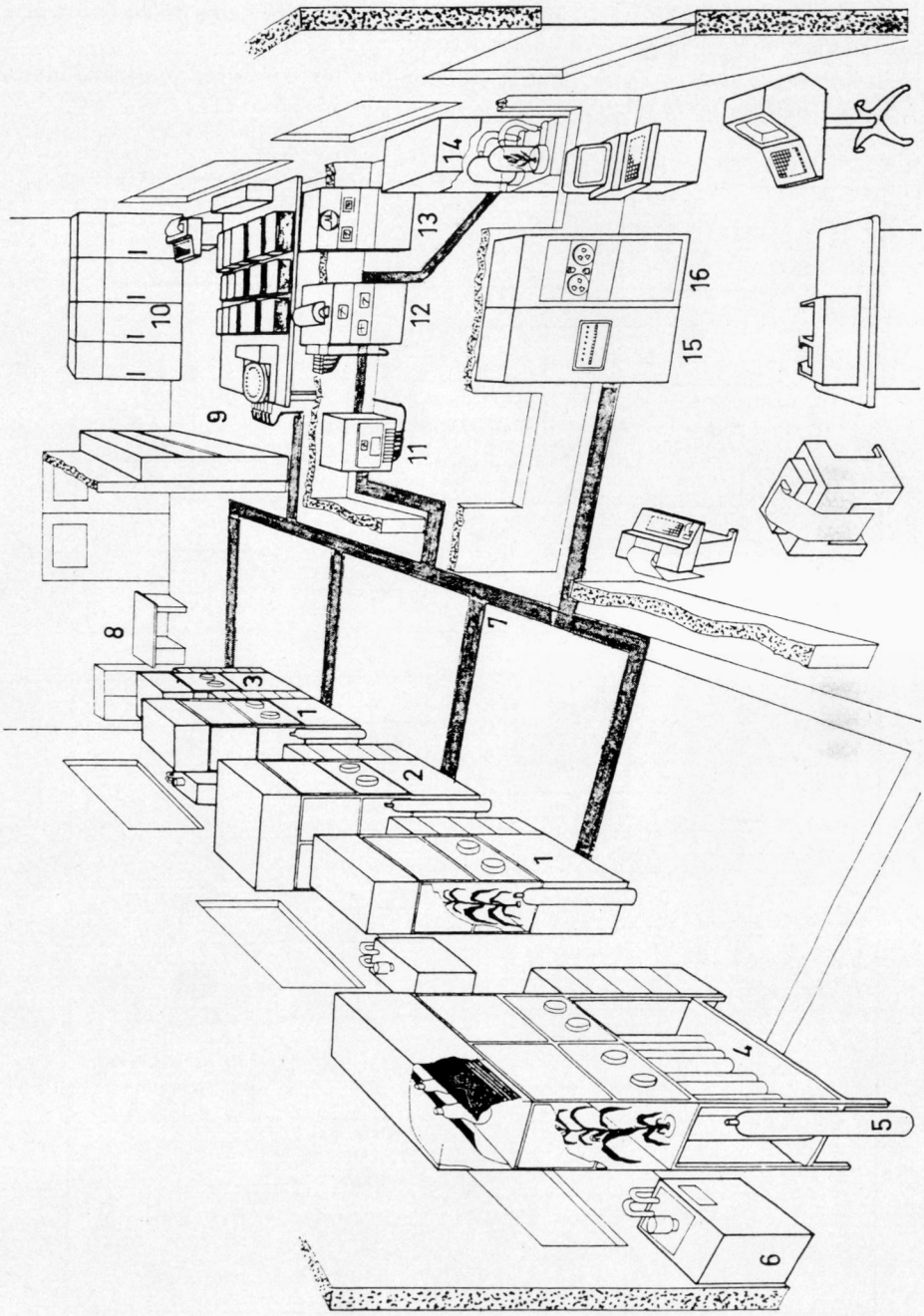


FIG. 1.

et de périphériques décrits figure 2. Son logiciel réalise simultanément les fonctions suivantes :

— conduite en temps réel des chambres $C_2$3A, du spectromètre de masse associé et du système d'analyse minérale automatique,

— « dialogue » avec l'opérateur pour modifier les consignes expérimentales, les actions, contrôles et régulations,

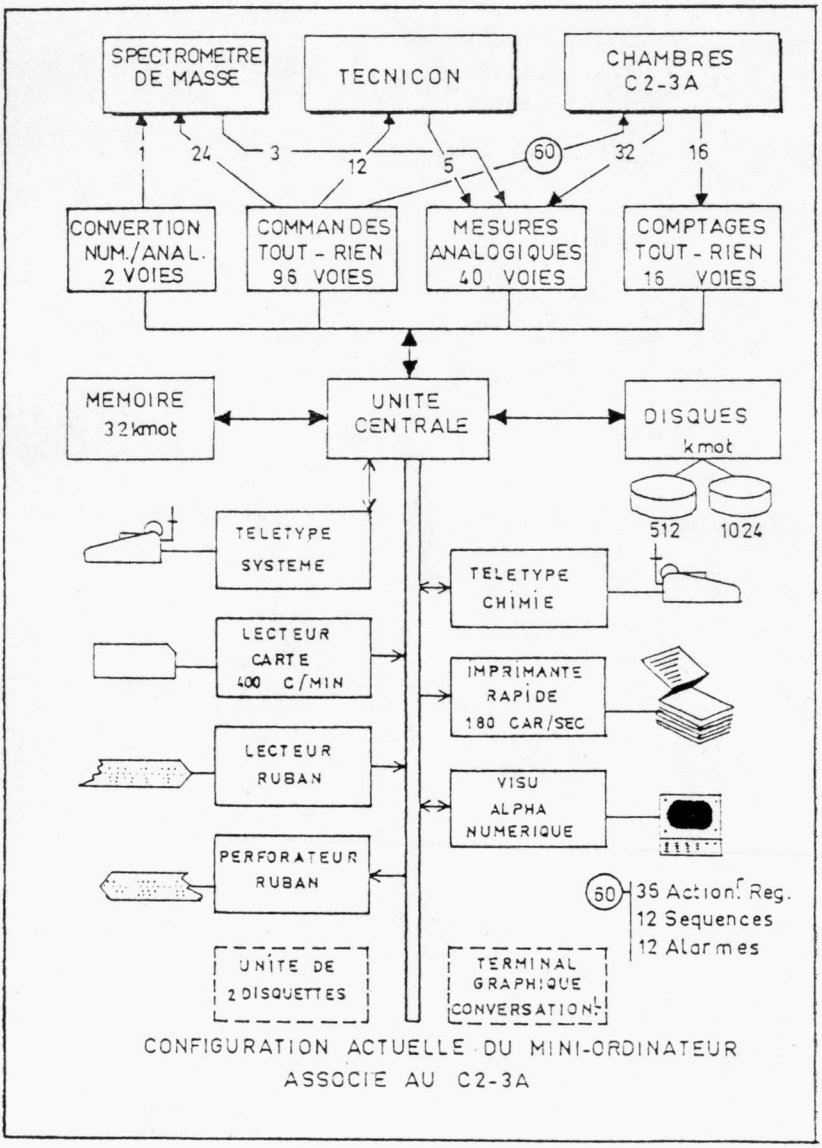


FIG. 2. — ***Configuration actuelle et projetée du mini-ordinateur associé au $C_2$3A.***
Actual and projected diagram of the mini-computer.

— archivage des mesures et bilan sous forme de journaux accessibles aux chercheurs, tracé de courbes,

— travaux en back-ground pour la mise au point de logiciels ou les calculs numériques sur les données.

Les trois premiers points, qui constituent le logiciel d'application, ont été réalisés sous le nom de CERES par le Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique du CEA (LETI) Grenoble.

Fonction « Temps Réel »

Le logiciel temps réel comprend en tout 174 k mots et se trouve situé sur disque. Il est segmenté en de nombreux programmes qui sont appelés en mémoire vive successivement pour exécution. Les données des expériences sont perforées sur cartes. Elles comprennent en particulier les informations suivantes :

— nom des unités expérimentales (chambre $C_2$3A, gaz de référence) avec les capteurs, régulations, mesures qui leur sont associés,

— les séquences de commande (jour/nuit ou vidange de solution) pour chacune des unités,

— la liste des pics (unité de masse) mesurés au spectromètre de masse avec leur particularité de traitement,

— la périodicité des mesures (scrutations) faites sur les chambres ou au spectromètre de masse. Pour cela chaque unité expérimentale figure sur une grille de cent pas dont chacun représente 1/100 d'heure et qui représente le plan de travail horaire de l'ordinateur. Les scrutations sur chaque unité sont répétées chaque heure selon le plan établi, chacune selon sa fréquence propre qui est au minimum de une fois à l'heure et au maximum (limite) de cent fois par heure.

Chambres $C_2$3A

Les chambres gardent leur régulation de température autonome mais les séquences jour/nuit, les mesures de température, humidité, lumière, débits, etc... et les régulations quantifiées (CO_2-H_2O) sont prises en charge par l'ordinateur. La fréquence de scrutation est en moyenne de 6 par heure et les mesures sont ainsi discontinues ; mais entre les scrutations les opérations des régulations (injection de CO_2 par exemple) sont maintenues de façon régulière et comptabilisées. Un tiroir de reprise en secours permet de libérer du CO_2 à une fréquence préréglée en cas d'incident sur l'ordinateur mais ce dispositif n'est pratiquement jamais utilisé : la disponibilité de l'ordinateur est de l'ordre de 99 p. 100 sur des périodes d'expérience allant jusqu'à 5,5 mois consécutifs.

Spectromètre de masse

C'est dans l'exploitation du spectromètre de masse que l'ordinateur donne la mesure de ses possibilités. L'unité expérimentale définie peut être l'atmosphère d'une chambre, celle des racines ou un gaz étalon, unités placées dans la grille de scrutation en position judicieuse pour minimiser les interférences. L'analyse peut accompagner ou non les mesures physiques sur une chambre. Les mesures ne sont effectuées que sur les pics (unités de masse) nécessaires. Le domaine des unités de masse étant linéairement défini par une tension variant de 0 à 10 V, l'ordinateur génère successivement les

tensions correspondant aux pics à mesurer. En fait, plusieurs points sont mesurés au voisinage et de part et d'autre du sommet théorique de chaque pic, ce qui permet, le cas échéant, de rectifier le centrage des pics. Au total cent vingt points de mesure sont effectués, l'appareil répétant les opérations autant de fois que nécessaire et ceci pendant 9 s. Les mesures sur chaque pic sont moyennées et normalisées sur un (ou plusieurs) pic de référence. On voit que le grand nombre de mesures minimise l'influence du bruit de fond électronique par ailleurs intégré par la chaîne de mesure. Des possibilités variées sont offertes pour exprimer les mesures en terme de différence par rapport à une atmosphère ou gaz de référence.

En pratique la fréquence d'analyse (quantitative et isotopique) est globalement de

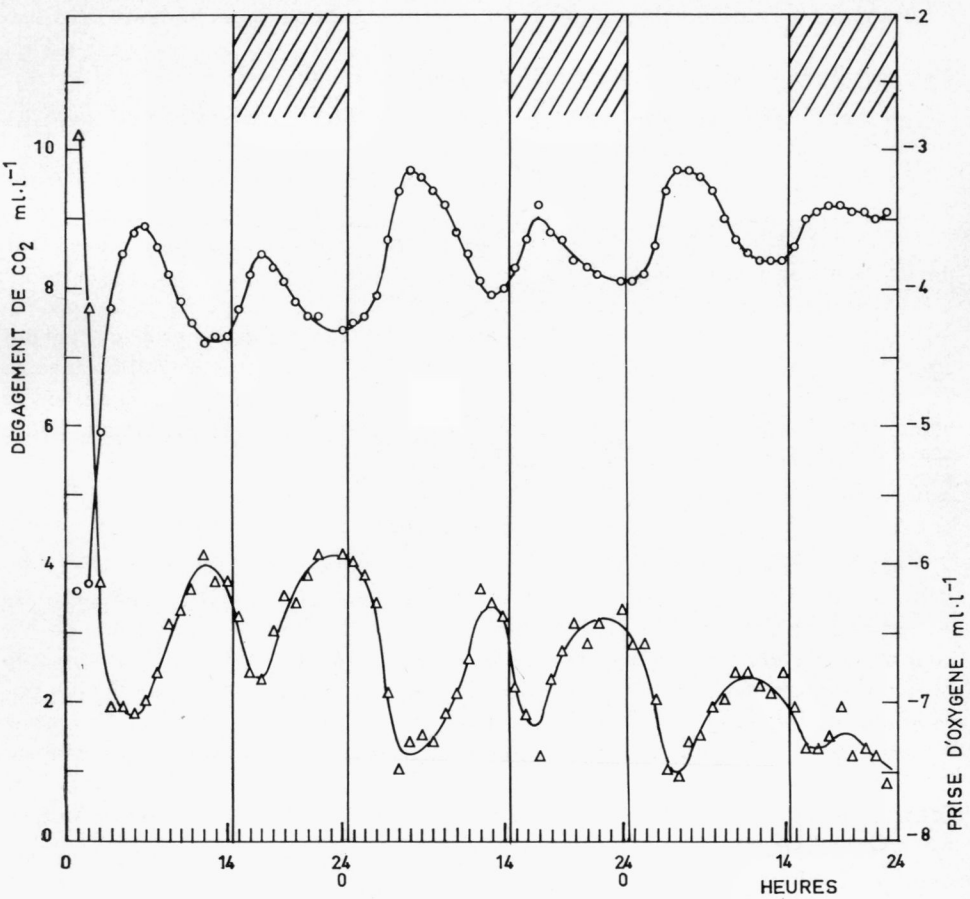


FIG. 3. — *Respiration racinaire d'une touffe de blé mesurée à la fois par le dégagement de* CO_2 (○) *et la prise d'oxygène* (Δ) *dans le courant gazeux d'aération* (débit 5 $l.h^{-1}$). On peut noter les oscillations caractéristiques de période 12 h ; la dérive générale due à la croissance (10 p. 100 j^{-1}) ; le quotient respiratoire voisin de 1,2 et la faible différence de vitesse moyenne entre les périodes éclairées et obscures (hachurées). Au temps zéro, renouvellement du milieu nutritif.

Root respiration of a tuft of wheat measured either by CO_2 *evolution* (○) *and* O_2 *uptake* (Δ) *on the aerating gas* (flow rate : 5 $l.h^{-1}$). Notice the typical oscillations with a 12 h period; the general drift, due to the growth of the plant (10 p. 100 day $^{-1}$) ; the respiratory ratio, near 1.2, and the small difference between the average rate of light and dark periods. At zero time, renewal of nutrient solution.

30 par heure, poursuivie jour et nuit pendant plusieurs mois sans interventions particulières. La fiabilité des résultats dépend essentiellement des gaz-étalons de référence (test) introduits dans les scrutations et archivés au même titre que les expériences. La figure 3, reproduction de courbes tracées directement sur l'imprimante, illustre à la fois les performances du spectromètre de masse et du système d'exploitation des données.

Analyse chimique automatique

Alors que la gestion du spectromètre de masse est considérée comme une variante des mesures sur une chambre, celle de l'équipement Technicon en est dissociée. L'analyse chimique est tributaire d'un temps de réaction propre à chaque élément (de 5 à 20 mn) et ne peut être conduite en synchronisme comme le spectromètre de masse.

La séquence de mesure est ici la série de solutions (étalon, fraîches, usées) définie selon les besoins par un jeu de cent cartes données qui comportent, si nécessaire, les informations requises pour les calculs de consommation journalière. Cinq éléments peuvent être analysés en parallèle sur des solutions provenant de quatre chambres (ou plants) différents. Les résultats sont présentés en ligne sur un télétype spécialisé et sont archivés sous forme de journaux qui bénéficient des mêmes possibilités (visualisation, édition, courbes) que les données issues des chambres ou du spectromètre de masse. La figure 4 donne en exemple les possibilités du système. Il s'agit de la mesure en ligne chaque demi-heure de la consommation de potassium (K) sur un plant de maïs en bonne condition de croissance pour déterminer un rythme de consommation jour/nuit (les mêmes mesures sont faites simultanément sur NH_4, NO_3 et PO_4). On note ici un ralentissement notable de la vitesse de consommation seulement en fin de nuit. Ce type de résultat nous permet actuellement d'analyser l'influence d'une réduction de lumière simulant un jour couvert.

Fonction « Dialogue »

Les paramètres de conduite des expériences, initialisés par la lecture d'une série de cartes perforées, peuvent être modifiés à tout moment par des ordres condensés ou macro-instructions ; comportant une clé en deux lettres permettant le choix du logiciel concerné (ex. : GP = Gestion Process) ou l'indication de la fonction à modifier. Dans ce cas s'ajoute une série de nombres dans l'ordre convenu pour modifier certains paramètres (consignes de régulation, n° de pic à mesurer ou à supprimer), ex. : CR (C4, AC, 330), signifie « La Consigne de Régulation, pour la Chambre 4, à partir de l'Analyseur de CO_2, doit être 330 $\mu l.l^{-1}$ ». Les erreurs logiques sont signalées et ne pertubent pas les expériences. Ces commandes — peu fréquentes — sont accessibles aux expérimentateurs.

Fonction Archivage et exploitation des données

Fichier tournant.

Sur chaque expérience, les mesures de chaque scrutation, définie dans la grille vue plus haut, sont enregistrées en mémoire vive sous forme de journal brut dans un fichier tournant de 3 h d'autonomie. Ce journal peut être consulté à l'écran ou édité facilement par l'expérimentateur. Il sera la source de l'archivage sur disque.

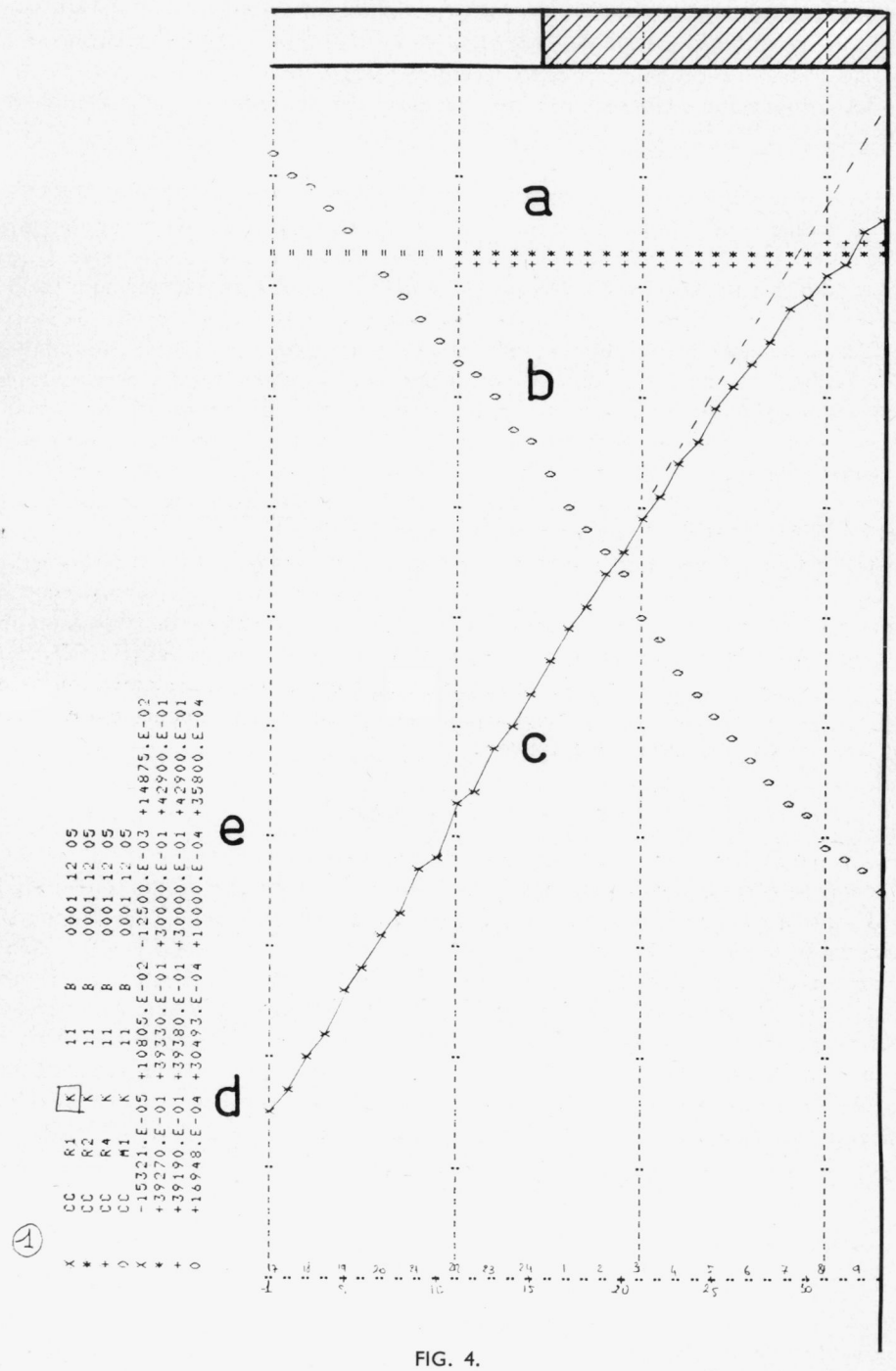

a
b
c
d
e
X CC R1 11 B 0001 12 05
* CC R2 11 B 0001 12 05
+ CC R4 K 11 B 0001 12 05
O CC M1 K 11 B 0001 12 05
X -15321.E-05 +10805.E-02 -12500.E-03 +14875.E-02
* +39270.E-01 +39330.E-01 +30000.E-01 +42900.E-01
+ +39190.E-01 +39380.E-01 +30000.E-01 +42900.E-01
O +16948.E-04 +30493.E-04 +10000.E-04 +35800.E-04

FIG. 4.

Archivage sur disque.

L'archivage utilise un disque de 1 024 k mots. Il n'est pas systématique et il est géré par un programme (ARCHIV) et des commandes spéciales. Pour chaque unité expérimentale on peut avoir, à la demande, l'archivage des journaux bruts ou leur condensation en moyennes horaires (fig. 4 de la 1re partie) elles-mêmes condensées chaque jour en deux moyennes journalières (jour/nuit), selon que l'expérience nécessite une étude sur un pas de temps court ou au contraire se déroule sur plusieurs mois avec un pas de mesure journalier. Le calcul des moyennes horaires s'accompagne du calcul des écarts type. Sur les moyennes journalières (jour et nuit) l'écart type correspond à la dispersion des valeurs horaires (cf. fig. 5 de la 1re partie). Sous forme simple une fonction dialogue est réalisée par ce logiciel, accessible à l'opérateur pour gérer les fichiers (création, affectation, suppression) et à l'expérimentateur pour obtenir le nombre et le numéro des journaux affectés à l'expérience. Il peut ensuite les visualiser sur un écran, les éditer et tracer des courbes à partir d'une série de mesures ou de bilans. Cette dernière possibilité utilise l'imprimante rapide et permet de comparer à échelle très dilatée des résultats provenant d'unités et (ou) de périodes de temps différentes (fig. 3, 4).

L'autonomie de stockage est d'environ une semaine. Elle sera complétée prochainement par un stockage prolongé sur disquettes souples compatibles IBM.

Travaux en Back-Ground

Les possibilités très étendues de cette gamme de mini-ordinateur, en particulier leur court temps d'opération unitaire (10 μs) et leur logiciel interne RTDES (Real Time Disque Execution Software) très évolué, permettent d'utiliser les temps libres pour accomplir d'autres tâches. Elles sont exécutées avec la plus faible priorité, c'est-à-dire qu'elles sont suspendues pour l'accomplissement des opérations séquentielles du temps réel, des commandes de l'opérateur ou des éditions et archivages. Cela représente néanmoins un potentiel de travail informatique considérable évalué à 50 p. 100 du temps d'unité centrale pendant les heures ouvrables dans notre cas et ce malgré le nombre important de tâches effectuées.

Du point de vue mémoire — sous réserve d'un accès faible priorité — 9 k mots sont disponibles pour ce type de travail ce qui, compte tenu de l'utilisation du disque

FIG. 4. — *Sortie graphique sur imprimante montrant l'influence de la période nocturne (hachurée) sur la consommation du potassium* (K).

En abcisse, le temps — 1 point de mesure par 1/2 h. En ordonnées : (*a*) Valeur des signaux (mV) mesurés sur l'étalon K. (*b*) Décroissance de la concentration (mMole l^{-1}) due à la plante. (*c*) Consommation cumulée (en mMole) de la plante en tenant compte des apports variables de solution fraîche compensant la transpiration. (*d*) Extremum des résultats tracés. (*e*) Echelles choisies correspondant aux cent vingt-neuf pas de l'imprimante.

Output on printer showing the influence of the dark period (hatched) on the potassium consumption of maize.

In abscissa, the time : one point of measure per half hour. In ordinate : (*a*) Value of the signal (mV) measured on the standard K. (*b*) Decrease of the concentration (mMole l^{-1}) due to the plant. (*c*) Cumulative consumption (mMole) of the plant, taking into account to the variable supply of the fresh solution balancing the transpiration. (*d*) Numerical extremal values of the data. (*e*) Numeric scales of the graph corresponding to the hundred twenty-nine steps of the printer.

comme mémoire virtuelle, représente des possibilités de travail du même ordre que celles évoquées plus haut. Elles seront affectées essentiellement au traitement des données selon les besoins des expérimentateurs. On utilisera des logiciels mis au point par ailleurs (Thiery, 1977) ou écrits spécialement en langage Fortran. La mise au point et la compilation pouvant également être effectuées en Back-ground.

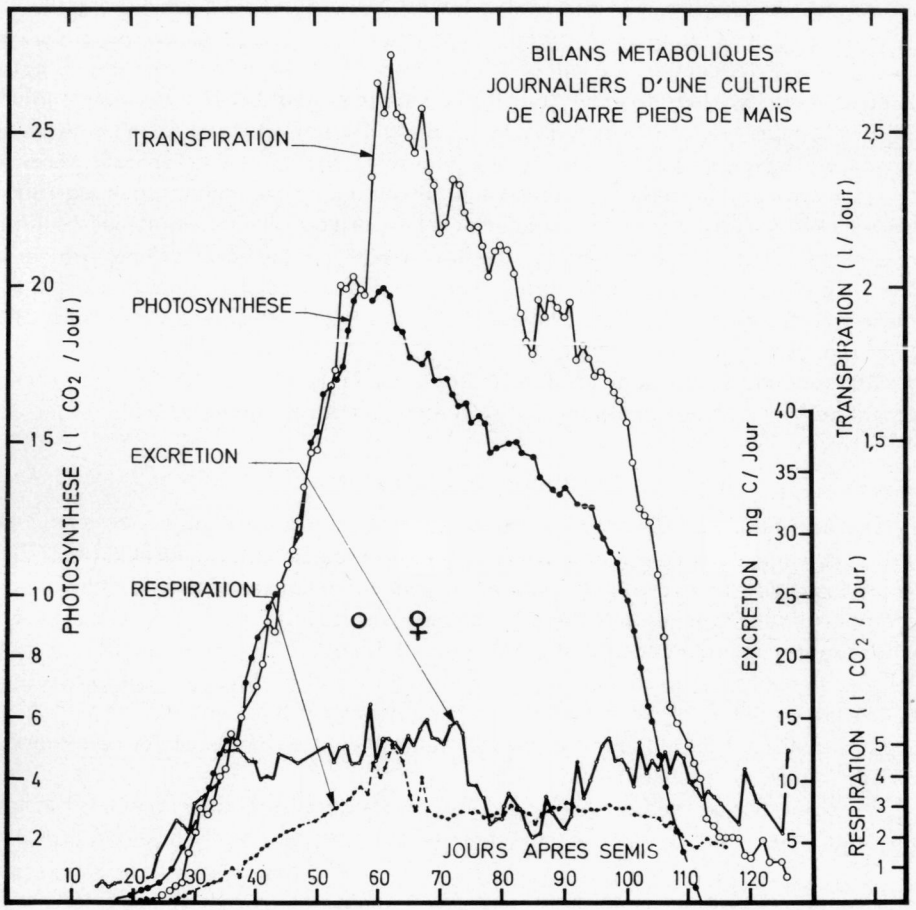


FIG. 5. — *Bilans métaboliques journaliers sur une culture de quatre plants de maïs* (INRA $F_7 \times F_2$). Conditions : jour/nuit 14 h/10 h. Températures 27/20 °C, point de rosée 22/18 °C. Eclairement 400 W m^{-2} à 1 m. Apparition des panicules ○, sortie de soies ♀..

On observe : 1) Le parallélisme entre Photosynthèse et Transpiration, la discontinuité entre montée en végétation et fructification. 2) La lente baisse d'efficacité photosynthétique dans cette dernière phase et 3) Les valeurs de la respiration nocturne et de l'excrétion racinaire, respectivement en moyenne 20 p. 100 et 0,2 p. 100 de l'assimilation diurne de carbone (Photosynthèse).

Daily metabolic balance of the culture of four maize plants (INRA $F_7 \times F_2$). Experimental conditions : day/night 14 h/10 h. Temperature 27/20 °C, dew point 22/18 °C. PAR : 400 W m^{-2} at height of 1 m. Panicles appearance (○), silking (♀).

Notice : 1) Parallel time course of Photosynthesis and Transpiration, discontinuity between vegetative raising and fructification. 2) The slow decrease of the photosynthetic efficiency during the last phase and 3) The values of the night respiration and the root excretion, their average are 20 p. 100 and 0.2 p. 100 of the diurnal assimilation of carbon respectively.

Résultats

Le système de chambre $C_2$3A est en service depuis de nombreuses années. Dès 1972 il a permis la culture du maïs à maturité en produisant de la paille et du grain uniformément marqué au ^{14}C pour les besoins de la recherche agronomique (Hétier, 1975 ; Lespinat *et al.*, 1976 ; Michel *et al.*, 1975). Parallèlement ont été amorcées des études physiologiques impliquant l'utilisation d'isotopes (Lespinat *et al.*, 1975) ou d'enceintes étanches avec maîtrise de la composition de l'atmosphère (Clamon, 1974).

Le système informatique et l'équipement associé, en particulier le système d'analyse minérale automatique, est mis en place progressivement depuis 1974 et les méthodes de quantification métabolique testées sur plusieurs cultures de maïs à maturité pour obtenir les profils de photosynthèse, transpiration (André *et al.*, 1978*a*) simultanément à ceux de nutrition minérale sur N(NH_4, NO_3), P, K, Ca, le volume, la

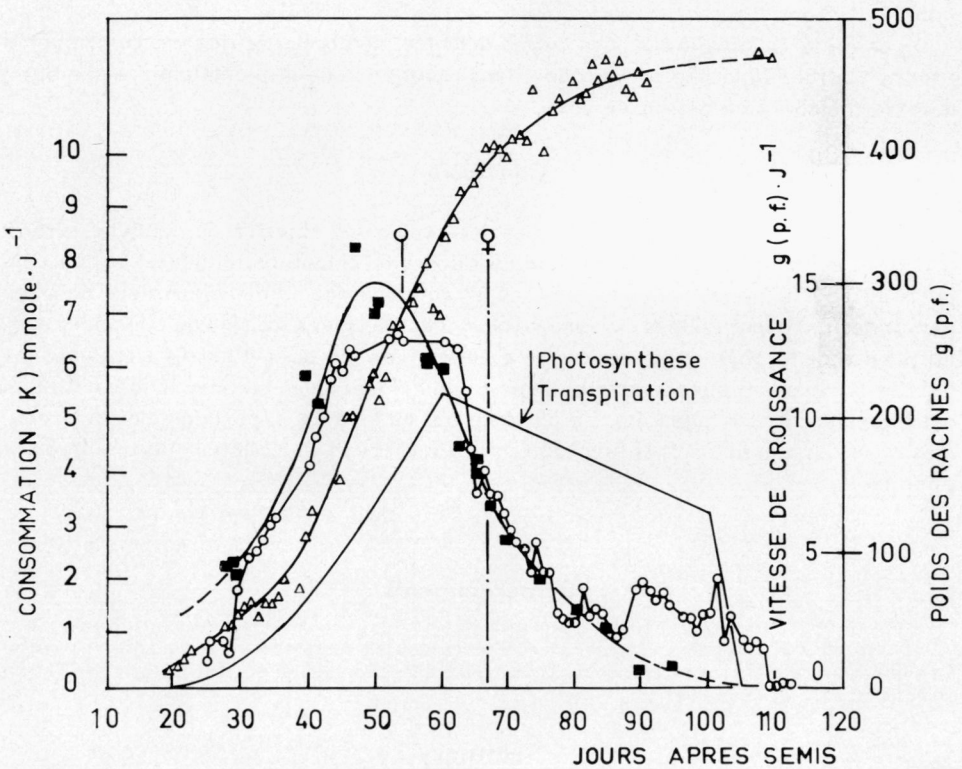


FIG. 6. — *Bilans du métabolisme racinaire pendant un cycle végétatif du maïs* (cf. fig. 5). On note que la consommation de K(○) est corrélée à la vitesse de croissance des racines (■) plutôt qu'à leur masse (Δ), à la vitesse de croissance totale de la plante (assimilée ici à la photosynthèse journalière) ou à la vitesse de transpiration (trait continu). O apparition des panicules, ♀ sortie des soies.

Daily metabolic balances of the roots during a life cycle of maize (cf. fig. 5). Notice that the Potassium consumption (○) is correlated to the growth rate of the roots (■) rather than to the mass of this organ (Δ) or to the total growth rate of the plant (assimilated to the daily photosynthesis) or to the rate of transpiration (the profile of the two last rates are platted in continuous line). Panicle appearance (O), silking (♀).

respiration et l'excrétion racinaire (André *et al.*, 1978*b*) pendant un cycle végétatif complet en conditions climatiques favorables constantes (fig. 5 et 6). Les travaux en cours sur ce point concernent l'étude de ces profils dans le cas d'une évolution saisonnière simulant un climat réel en collaboration avec le CNRS et l'INRA.

Mais l'essentiel des recherches est centré sur l'étude de la photorespiration mesurée par la consommation d'oxygène ($^{18}O_2$) observable parallèlement à la production d'oxygène photosynthétique ($^{16}O_2$). Les premiers résultats montrent chez le maïs une consommation du même ordre que celle de la respiration nocturne mais qui s'accroît très vite en CO_2 limitant (André et Gerbaud, 1979). Sur le blé, par contre, ce phénomène est très important, égal à 100 p. 100 de la photosynthèse apparente — en bonne condition de croissance — et de l'ordre de cinq fois la respiration obscure (Gerbaud et André, 1979). Il est modulé par une variation de la pression de CO_2 avec la particularité que la production vraie d'oxygène reste sensiblement constante ; on en déduit que le pouvoir réducteur d'origine photosynthétique est indépendant de la pression de CO_2 et, en l'occurrence, deux fois supérieur à celui qui est utilisé pour la carboxylation.

Les mesures simultanées des autres activités métaboliques doivent contribuer à préciser le rôle de la photorespiration dans l'économie de la plante entière et notamment le métabolisme de l'azote.

Conclusion

La solution informatique répond pleinement à ses objectifs de conduite sûre et précise d'équipements complexes. Elle est particulièrement avantageuses si l'on rapporte le coût d'amortissement, entretien et conduite (au total l'équivalent de deux personnes/an) à la qualité et au nombre de tâches effectuées. Le rôle qu'elle peut jouer, au service de la physiologie de la plante entière comme pour d'autres disciplines, ne peut se comparer à aucune prestation de travail classique et renouvelle la conception des expériences envisageables. La pluralité des techniques expérimentales ainsi réunies offre des conditions très favorables pour un travail de collaboration multi-disciplinaire.

Reçu pour publication en mai 1979.

Remerciements

Nous remercions les personnes qui ont réalisé les logiciels d'exploitation de cet ensemble instrumental et particulièrement M. Darier du Laboratoire d'Electronique et des Technologies de l'Informatique (LETI) à Grenoble.

Summary

The $C_2$3A Laboratory. A tool for the study of whole plant physiology

II. — *Possibilities of the mini-informatic and first results*

A mini-computer drives in real times the $C_2$3A growth chambers and the associated measurement systems : mass-spectrometer and automatic chemical analysis.

The data from different experiments was stored on a magnetic disc and processed on gross or condensed form for hourly or daily journals, which are available as visual display or graphics and tables on a line printer.

Examples of results are given : hourly measurements on root atmosphere, potassium consumption ; daily metabolic balances under the life cycle on a maize crop : photosynthesis, transpiration, dark respiration, root excretions ; consumptions of nitrates and potassium in regard of the rate growth of the roots. Our main object is presently the study of photorespiration with $^{18}O_2$ and its role in the whole plant, especially in relation with the nitrogen metabolism ; but the system was designed for multidisciplinary purposes.

Zusammenfassung

Das C_2 3A Laboratorium, ein Werkzeug im Dienst der Physiologie der Gesamtpflanze.

II. — Verwendungsmöglichkeiten der mini-informatik und erste Ergebnisse

Eine Minicomputer sichert die Datenverarbeitung des C_2 3A in vernünftiger Zeit und der damit verbundenen Messysteme nämlich einem Quadrupolmassenspektrometer und einer Anlage für automatische chemische Analyse.

Die Messergebnisse der verschiedenen Experimente werden auf einer Scheibe gespeichert und sind dann in unbearbeiteter Form oder in kondensierter Form entweder als stündliche Ergebnisse oder für den ganze Tagesablauf verfügbar. Sie können auf einem Bildschirm sichtbar gemacht werdenkönnen aber auch elaboriert als Kurven gezeichnet werden.

Es werden Beispiele von Messergebnissen angefügt : Stündliche Messungen der Wurzelatmosphäre und des Kaliumverbrauchs ; ferner Tagesbilanzen einer Maiskultur bis zur Reife mit den Details Photosynthese, Transpiration, nächtliche Atmung, Wurzelausscheidung, Nitrat- und Kaliumverbrauch. Die laufenden Anwendungsmöglichkeiten betreffen besonders die Untersuchungen der Photorespiration mit ^{18}O und deren Rolle im Haushalt der ganzen Pflanze besonders bezüglich des Stickstoffstoffwechsels. Anderseits bleibt festzustellen dass die genannte Einrichtung sicherlich Anwendungsmöglichkeiten für verschiedenen Disziplinen bietet.

РЕЗЮМЕ

Лаборатория C_2 3A : новый инструмент для физиологии целого растения

II. — Возмзжности микро-информатики и первые результаты.

АНДРЕ М. ДАГЕНЭ А. МАССИМИНО Ж. МАССИМИНО Д. РИШО К.

Микро-ЭВМ управляет в действительное время Камерами Автоматического Разведения в Искусственных Атмосферах /C_2 3A/ и объединёнными измерительными системами : квадрупольным масс-спектрометром и автоматическим химическим анализом.

Разные опытные измерения сохраняются на пластинках и образуют сокращённые или полные, часовые или ежедневные журналы, которые можно рассмотреть на экране, издать или изобразить под видом обработанных результатов.

Авторы дают примеры результатов : почасовые измерения атмосферы корней и расхода K ежедневные балансы культуры пшеницы до зрелости : фотосинтез, испарение, ночное дыхание, корневые выделения, объём и корневое дыхание, расходы нитрата и K. Существующие применения касаются главным образом изучения фотодыхания с помощью $^{18}O_2$ и её роли в обмене веществ у целого растения, именно в метаболизме азота, но аппаратура представляет видимую многоотраслевкю применимость.

Références bibliographiques

ANDRÉ M., NERVI J. C., LESPINAT P., 1972. Régulation par échantillonnage à partir d'un spectromètre de masse de cellules de culture en atmosphères artificielles. *Automatique et Informatique Industrielle*, **9**, 27-31.

ANDRÉ M., NERVI J. C., LESPINAT P., MASSIMINO D., 1974. Units for automatic culture in artificial atmosphere « $C_2$3A » project. *Acta Hortic.* **39**, 59-70.

ANDRÉ M., MASSIMINO D., DAGUENET A., 1978*a*. Daily paterns under the life cycle of a Maïze crop. I. Photosynthesis, Transpiration, Respiration. *Physiol. Plant.*, **43,** 397-403.

ANDRÉ M., MASSIMINO D., DAGUENET A., 1978*b*. Daily paterns under the life cycle of a Maïze crop. II. Mineral nutrition, root respiration and root excretion. *Physiol. Plant.*, **44,** 197-204.

ANDRÉ M. et GERBAUD A., 1979. Consommation d'oxygène pendant la photosynthèse chez Zea mays à paraître in *C. R. Acad. Sc. Paris.*

ANDRÉ M., DAGUENET A., MASSIMINO D., VIVOLI J. P., RICHAUD C., 1979. Le laboratoire $C_2$3A. Un outil au service de la physiologie de la plante entière. I. — Les chambres de culture et les systèmes de mesures associés. *Ann. agron.* **30** (2), 139-151.

CLAMON G., 1974. *Etude de l'effet des faibles teneurs en oxygène sur la photosynthèse du maïs.* Thèse Doc. Spécialité. Université de Nice.

GERBAUD A., ANDRÉ M., 1979. Photosynthesis and Photorespiration in whole plants of wheat (à paraître in *Plant Physiol.*).

HÉTIER J. M., 1975. *Formation et évolution des andosols en climat tempéré.* Thèse Doc. Etat, Université de Nancy.

LESPINAT P. A., ANDRÉ M., BOUREAU M., 1975. Etude quantitative de carbone libéré par les racines de maïs cultivé en conditions contrôlées sous $^{14}CO_2$. *Physiol. Vég.*, **13,** 157-151.

LESPINAT P. A., HÉTIER J. M., THOMANN C., CHONE R., 1976. Utilisation du maïs uniformément marqué au ^{14}C pour l'étude de la matière organique de trois sols (andosol, sol brun, sol ferralitique). *Sci. Sol., Bull. Assoc. Fr. Etude Sol*, n° 1, 53-66.

MICHEL J. P., RIGOUARD M., BERGER G., SAINT-LEBE L., 1975. Une technique de dilution isotopique pour le dosage de produits carbonylés de faible poids moléculaire formés au cours de l'irradiation de l'amidon de maïs. *Stärke*, **27,** 363-368.

THIERY J. M., 1977. Spectral System. *Rapport interne du Département de Biologie*, CEN Saclay, France.

Ann. agron., 1979, **30** (2), 167-178.

Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles, dans la plaine de la Hardt

I. — Etat des réserves organiques

J.E. DELPHIN et A. Ph. CONÉSA

avec la collaboration technique de Christiane HUCK et Dominique MEYER

Station d'agronomie,
Centre de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
28, *rue de Herrlisheim*, 68021 *Colmar*

Résumé

Les auteurs examinent l'incidence de différents systèmes de culture sur le niveau organique du sol après 10 années d'expérimentation sur sol caillouteux. Cet essai compare six rotations comportant des cultures céréalières, industrielles, intensives et fourragères (luzerne). Sont testés, de plus, les effets de l'irrigation et de la restitution des résidus de récolte. Les teneurs en matière organique du sol sont appréciées à partir de l'analyse du carbone et de l'azote total.

Les parcelles avec restitution des pailles présentent un niveau organique significativement supérieur à celui des parcelles sans enfouissement des résidus de récolte.

L'irrigation diminue sensiblement les réserves humiques du sol.

L'augmentation des teneurs en matière organique du sol en présence d'une légumineuse est d'autant plus importante que la place de cette culture au sein de la rotation est prépondérante.

La présence d'une luzernière dans la rotation est marquée par une augmentation significative du rapport C/N alors que ce même rapport est sensiblement plus faible en culture irriguée. Un fractionnement des matières organiques libres et liées n'apporte que partiellement des éléments d'explication.

Introduction

Le problème de l'évolution des réserves organiques du sol en culture n'est pas nouveau. Il s'est posé à propos de la mécanisation et de la disparition de la traction animale. Il se pose actuellement en d'autres termes : simplification des successions de culture et intensification de certaines techniques culturales (irrigation, exportation des pailles).

Les statistiques à l'échelon national permettent de constater une progression de la proportion des céréales dans les terres labourables ainsi qu'une augmentation du retour d'une même culture sur une parcelle (Sebillotte, 1975).

Cette évolution se manifeste en Alsace et plus particulièrement dans la plaine de la Hardt où les surfaces céréalières représentent 77 p. 100 des terres labourables. L'orge de printemps, le maïs et le blé tendre occupent 97 p. 100 de la sole céréalière (Goussault, 1976). De ce fait les rotations sont simplifiées ; à titre d'exemple, la culture précédant un maïs est représentée pour 58 p. 100 par un blé, 20 p. 100 par une orge et 17 p. 100 par un maïs (enquête maïs 1977, Station d'Agronomie de Colmar). On assiste, de plus, dans cette région, à un important développement de l'irrigation et à l'exportation des pailles telle que la pratiquent certains céréaliers.

La réduction des apports organiques, provenant de cette évolution des systèmes de culture et de la spécialisation des systèmes de production, peut compromettre l'équilibre des réserves organiques du sol. Aussi est-on amené à préciser le sens et la vitesse d'évolution de la matière organique, ainsi que son niveau à l'équilibre, tels qu'ils résultent de l'application de techniques et successions culturales actuelles, dans un contexte pédoclimatique donné.

De nombreuses expériences ont mis en évidence l'incidence de la matière organique sur le potentiel productif du sol : rôle au niveau des propriétés physiques, chimiques et mécaniques, effet spécifique sur la croissance et le développement des végétaux.

L'étude des répercussions des cultures sur l'évolution du stock organique du sol est plus difficile à réaliser en raison de la lenteur des mécanismes en cause et de la multiplicité des facteurs qui interviennent. Les expériences de longue durée répondent à ces objectifs : Rothamsted en Angleterre, Grignon en France, Halle en Allemagne, Askov au Danemark, parcelles Morrow aux U.S.A., pour ne citer que les principales. Cependant ces essais mettent en œuvre des rotations et des niveaux techniques qui sont souvent sans rapport avec les pratiques culturales modernes. Aussi, les expériences récentes de moyenne durée (10-15 ans) fournissent-elles des renseignements indispensables à la connaissance des systèmes actuels de grandes cultures.

Des expérimentations de ce type ont été implantées en France : Auzeville, Montluel (Boiffin et Sebillote, 1975), Montereau, Hagetmau et Algolsheim (Specty, 1975). L'objectif de l'essai d'Algolsheim, mis en place en 1966, est de comparer la productivité de différents systèmes de culture pratiqués au niveau régional. Après 10 années d'expérimentation, nous avons été amené à analyser les effets cumulés des successions et techniques de culture sur les réserves organiques du sol afin d'éclairer les différences de productivité observées.

Milieu et méthodes expérimentales employées

Le climat

Etant donnée l'importance du régime climatique sur l'évolution de la matière organique dans le sol (Duchaufour et Jacquin, 1959) nous rappellerons brièvement les caractères du climat régional. L'essai d'Algolsheim bénéficie d'un climat continental caractérisé par des précipitations annuelles faibles (516 mm) avec un maximum pendant les mois d'été et une forte amplitude entre les températures moyennes des mois d'été et d'hiver (tabl. I).

TABLEAU 1

Données climatiques mensuelles de Colmar : moyennes 1895-1974 *des températures et précipitations ; moyennes* 1972-1975 *des* ETP

Monthly temperature, rainfall and ETP

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Température °C ...	1,5	3,1	6,5	10,6	15,2	18,4	20,2	19,4	16,0	10,6	5,5	2,6	10,8
Précipitations mm .	27,0	23,7	29,8	37,8	54,0	63,6	60,4	59,5	49,6	88,4	43,1	29,5	516,4
ETP (Turc) mm	0,2	0,5	1,4	2,3	3,3	119,0	134,1	117,0	78,4	6,5	1,1	0,3	464,1

Le sol

Le sol de texture sablo-argileuse est peu profond (40-70 cm). Il repose sur le cailloutis d'alluvions du Rhin et présente une hétérogénéité dans la proportion de graviers et cailloux. Ce sol légèrement calcaire est normalement pourvu en matière organique et possède un niveau potassique et phosphorique satisfaisant (tabl. 2).

TABLEAU 2

Caractéristiques physico-chimiques du sol (0-25 cm)

Physical and chemical analysis of the top soil (0-25 cm)

Graviers et cailloux (p. 100)	40-70
Profondeur du sol (cm)	40-70
Argile (p. 100)	15,0
Limon	12,4
Sable fin (p. 100)	37,9
Sable grossier (p. 100)	34,7
Densité apparente partielle de la fraction fine	0,5-0,8
Vitesse de filtration (m/s)	$3\ 10^{-3}$
pH eau	7,3
Capacité d'échange des cations (meq/100 g)	8,8
Carbone organique (p. 1 000)	13,3
Azote total (p. 1 000)	1,34
Calcaire total (p. 1 000)	7,9
P_2O_5 (Dyer) (p. 1 000)	0,69
K_2O échangeable (p. 1 000)	0,11

Dispositif de l'essai

Une description détaillée du dispositif a été présentée dans une publication antérieure (Specty 1975) ; nous nous bornerons ici à l'exposé des éléments indispensables à la compréhension de notre travail.

Le dispositif comporte six rotations d'une durée de 4 ou 8 ans :

Rotation céréalière : maïs, maïs, blé dur, orge de printemps.

Rotation céréales-luzerne : maïs, maïs, blé dur, orge de printemps, 4 années de luzerne.

Rotation mixte : maïs, pois, colza, blé tendre d'hiver.

Rotation mixte-luzerne : maïs, pois, colza, blé tendre d'hiver, 4 années de luzerne.

Rotation intensive : maïs, pois suivi de haricot, blé tendre d'hiver, orge de printemps.

Rotation intensive-luzerne : maïs, pois suivi de haricot, blé tendre d'hiver, orge de printemps, 4 années de luzerne.

Pour concilier les impératifs de succession de culture et la prise en compte des variations interannuelles (effet année), les débuts des rotations ont été décalés dans les différentes parcelles. Ainsi, chaque année, toutes les cultures prévues sont présentes sur le terrain à leur place dans les diverses rotations. Le dispositif comporte trente-six parcelles de 1 510 m².

a) Douze parcelles comprenant les rotations céréalières ont été subdivisées en carrés latins intégrant les quatre traitements suivants sur seize sous-parcelles :

irrigation par aspersion, non irrigation ;
enfouissement, exportation des résidus de récolte.

b) pour les rotations mixtes et intensives, vingt-quatre parcelles ont été découpées en bloc (deux sous-parcelles) comportant les traitements irrigation (sur les 2/3 de la surface) et non irrigation (sur 1/3 de la surface), les résidus de récolte étant enfouis.

Les restitutions des résidus de céréales sont accompagnées d'un apport de 50 kg/ha d'azote. Dans le cas de la luzerne la quatrième coupe de la dernière année de culture est enfouie.

La fertilisation est établie de manière à compenser, pour chaque culture, les exportations des parcelles les plus productives. La quantité d'eau d'irrigation est calculée de manière à compenser le déficit P-ETP (Bouchet) lorsque celui-ci atteint 30 à 40 mm (tabl. 3).

TABLEAU 3

Fertilisation, densité de semis et irrigation annuelle
Annual rate of dressing, planting density and amount of irrigation water

	N kg ha^{-1}	P kg ha^{-1}	K kg ha^{-1}	Densité	Irrigation annuelle (moyenne de 10 ans)
Maïs grain	60 + 150	180	180	7 pl/m²	133 mm
Blé dur	110	180	180	350 pl/m²	93 mm
Orge de printemps	110	180	180	250 pl/m²	73 mm
Pois	30	180	180	130 pl/m²	66 mm
Haricot	50	50	100	53 pl/m²	74 mm
Colza	120	180	180	110 pl/m²	81 mm
Blé tendre d'hiver	60 + 50	180	180	250 pl/m²	91 mm
Luzerne	0	140	140	570 pl/m²	186 mm

Echantillonnage et méthodes d'analyses des sols

Les prélèvements, en 1976, ont été effectués au printemps à raison de cinq échantillons par sous-parcelle. L'échantillonnage porte sur les 25 premiers cm de sol.

La détermination du carbone organique total du sol est obtenue par oxydation en milieu sulfo-chromique sur des échantillons de sol broyés et passés au tamis de 0,2 mm d'ouverture (Anne, 1945).

L'analyse des teneurs en azote total du sol est effectuée selon la méthode Kjeldhal (Bremmer, 1965).

Les coefficients de variation calculés sur la base de 4 répétitions d'un même traitement permettent d'apprécier l'hétérogénéité de la répartition des matières organiques dans le sol. Ces valeurs sont les suivantes :

carbone organique : C.V. = 7,5 p. 100
azote total : C.V. = 6,0 p. 100

La séparation de la matière organique libre et liée est réalisée par densimétrie (Monnier *et al.*, 1962).

Méthodes d'analyses des données

En raison de l'absence de comparaison des traitements enfouissement-exportation des pailles pour les rotations mixtes et intensives, nous avons procédé à deux analyses de variance (Dagnélie, 1970).

Une analyse au niveau de la rotation céréalière intégrant l'ensemble des techniques de cultures et la présence de la luzernière (cent quatre-vingt-douze sous-parcelles).

Une analyse comparant les six rotations et ne tenant compte que du facteur irrigation (soixante-douze sous-parcelles).

On peut noter que ce dispositif expérimental comporte un nombre important de parcelles élémentaires (250) ce qui contribue à réduire l'erreur due à l'échantillonnage et aux mesures et à obtenir une très bonne précision au niveau des résultats.

Résultats

Effet des techniques de culture

1) *Enfouissement des pailles* (tabl. 4).

Après 10 années d'enfouissement des résidus de récolte, en rotations céréalières, les parcelles avec restitution présentent un niveau de teneurs en carbone et en azote total du sol supérieur à celui des parcelles où les pailles sont exportées, les variations représentant 7 à 8 p. 100 des teneurs moyennes. Le rapport C/N reste inchangé.

TABLEAU 4

Effet paille, rotations céréalières : carbone et azote total de la couche 0-25 cm
(moyenne de quatre-vingt-seize parcelles)

Cereal rotations : effect of straw ploughed in on the carbon and total nitrogen content of the top soil 25 cm

	C (p. 1 000)	N (p. 1 000)	C/N
Pailles restituées	13,0	1,31	9,9
Pailles exportées.....	12,1	1,20	10,1
	***	***	NS

2) *Irrigation* (tabl. 5).

Pour les rotations céréalières, les teneurs en carbone des parcelles irriguées sont significativement plus faibles que celles des parcelles non irriguées. Les différences observées représentent 4 p. 100 des teneurs moyennes en carbone. Elles sont particulièrement sensibles pour les parcelles comportant une luzerne ; dans ce cas, on

TABLEAU 5

Effet irrigation, rotations céréalières : carbone et azote total de la couche 0-25 cm
(moyenne de 96 parcelles)
Cereal rotations : effect of irrigation on the carbon and total nitrogen content of the top soil 25 cm

	C (p. 1 000)	N (p. 1 000)	C/N
Parcelles irriguées	12,3	1,24	9,8
Parcelles non irriguées	12,8	1,27	10,1
	*	NS	*

note des teneurs en carbone de 12,8 p. 100 et 13,8 p. 100, respectivement en culture irriguée et non irriguée soit une variation de 8 p. 100. Les mêmes tendances se manifestent pour les teneurs en azote total, les variations à ce niveau ne sont cependant pas significatives. De ce fait, les valeurs du rapport C/N sont sensiblement plus élevées en culture non irriguée. Ces résultats sont moins marqués pour les rotations mixtes et intensives.

Effet des rotations

On observe, en rotation céréalière interrompue par une luzerne, une augmentation de 20 p. 100 des teneurs en carbone du sol par rapport aux parcelles sans luzerne. Cette différence est cependant moins marquée pour les teneurs en azote total (11,5 p. 100) ; il en résulte une augmentation significative du rapport C/N du sol pour les parcelles interrompues par une luzernière (tabl. 6). Les mêmes observations sont faites en rotations mixtes et intensives sans que, à ce niveau, les modifications du rapport C/N soient significatives.

TABLEAU 6

Effet luzerne, rotations céréalières : carbone et azote total de la couche 0-25 cm
Effect of lucerne in the cereal rotations on the carbon and total nitrogen content of the top soil 25 cm

	C (p. 1 000)	N (p. 1 000)	C/N
Rotation sans luzerne	11,0	1,15	9,5
Rotation avec luzerne	13,3	1,30	10,2
	***	***	**

Différences significatives au seuil 5 p. 100 : *, 1 p. 100 : **, 0,1 p. 100 : ***.

L'interaction qui se manifeste entre l'effet des trois rotations : céréalières, mixtes et intensives, et celui de la luzerne, nous a conduits à analyser séparément l'incidence des variantes de rotation (céréalière, mixte ou intensive) en fonction de la présence ou non d'une luzernière (tabl. 7).

TABLEAU 7

Effet rotations, parcelles avec restitution des pailles : carbone et azote total de la couche 0-25 cm (analyses 1976)

Plots with straw ploughed in : effect of rotations on the carbon and total nitrogen content of the top soil 25 cm

	C p. 1 000		moy.	N p. 1 000		moy.	C/N		moy.
	sans luz.	avec luz.		sans luz.	avec luz.		sans luz.	avec luz.	
Rotation céréalière ...	11,7	13,7	13,0	1,15	1,30	1,25	9,6	10,1	9,9
Rotation mixte	11,1	13,3	12,1	1,20	1,35	1,30	9,2	9,9	9,7
Rotation intensive	12,6	13,5	13,2	1,25	1,39	1,35	10,1	9,8	9,9
			* / ***			** / ***			NS / NS
Moyennes	11,8	13,5		1,20	1,35		9,6	9,9	

Variations significatives au seuil 5 p. 100 : *, 1 p. 100 : **, 0,1 p. 100 : ***, non significatives : NS.

Lorsque la luzernière est absente des successions de culture, la rotation intensive présente le niveau organique le plus élevé ; l'augmentation des teneurs en carbone par rapport aux rotations mixtes et céréalières représente respectivement 14 p. 100, 18 p. 100 et 4 p. 100, 9 p. 100 pour l'azote total.

Dans le cas des rotations interrompues par une luzernière, l'effet luzerne atténue ou même annule les variations imputables aux différentes variantes de rotation.

Matière organique libre et liée

Nous avons réalisé une séparation densimétrique de la matière organique totale du sol afin d'éclairer les variations du rapport C/N se manifestant à l'occasion de l'irrigation et du précédent luzerne. Cette analyse porte sur quarante-huit parcelles de la rotation céréalière (maïs, maïs blé dur, orge) et intègre les trois facteurs suivants : irrigation-non irrigation, restitution-exportation des pailles, présence-absence du précédent luzerne. L'effet irrigation, observé dans l'analyse portant sur l'ensemble du dispositif d'essai, ne se manifeste pas dans le cadre de ce nouvel échantillonnage plus restreint. Les résultats concernant l'incidence des deux autres facteurs se trouvent consignés dans le tableau 8.

La matière organique libre, en rotation sans luzerne, représente 2 p. 100 du carbone et 1,3 p. 100 de l'azote des réserves organiques totales. Ces proportions sont plus que doublées en présence d'une luzernière. L'enfouissement des pailles est marqué par une augmentation de 20-30 p. 100 de la fraction organique libre. Cette fraction, en raison de sa faible proportion et d'un rapport C/N relativement bas, ne modifie que partiellement, par ses variations, les résultats concernant la matière organique liée par rapport aux déterminations du carbone et de l'azote total du sol. Les variations du rapport C/N de la fraction liée en relation avec le précédent luzerne sont significatives au seuil 5 p. 100.

TABLEAU 8

Effets paille et luzerne en rotations céréalières ; Matière organique libre et liée (analyses 1976)
Cereal rotations : effect of straw plonghed in and lucerne on the free organic matter and humus

	M. O. libre			M. O. liée		
	C (p. 1 000)	N (p. 1 000)	C/N	C (p. 1 000)	N (p. 1 000)	C/N
Sans luzerne E ...	0,24	0,016	15,2	10,4	1,15	9,0
Sans luzerne NE ..	0,20	0,013	15,2	9,1	1,02	8,9
Avec luzerne E....	0,58	0,043	13,2	12,9	1,32	9,8
Avec luzerne NE .	0,45	0,032	13,9	12,2	1,21	10,1

E = pailles enfouies = straw ploughed in.
NE = pailles exportées = straw exported.

Discussion

L'incidence de l'enfouissement des résidus de récolte sur le niveau des réserves organiques du sol se manifeste très nettement. Cet effet est conforme à d'autres résultats (Demolon et Burgevin, 1940) ; il faut remarquer que la forte proportion de graviers et de cailloux se prête à une extériorisation rapide de l'action des restitutions organiques.

Nous l'avons remarqué, l'action de l'irrigation est particulièrement manifeste dans les parcelles sous luzerne. Cette culture reçoit par an, en moyenne, 50 p. 100 d'eau d'irrigation de plus qu'une culture de maïs et deux fois plus qu'une céréale d'hiver ou de printemps. L'effet de l'irrigation a été signalé par d'autres auteurs (Pratt *et al.*, 1957) : une baisse des teneurs en carbone du sol et une diminution simultanée du rapport C/N ont été observées sur vergers irrigués par rapport aux zones non irriguées.

Nous pouvons envisager l'intervention de deux mécanismes permettant d'éclairer les effets de l'irrigation : une stimulation de la minéralisation de la matière organique liée à l'hygropériodisme et un lessivage des substances humiques peu condensées.

Arsjad et Giddens (1966) ont montré que les alternances rapprochées de phases d'humectation et de dessiccation du sol stimulent l'activité minéralisatrice des microorganismes du sol. D'après Dommergues et Mangenot (1970), cette activation affecte plus le carbone organique que l'azote total du sol, ce qui est conforme aux résultats que nous avons obtenus.

Une incidence directe du régime hydrique sur les processus d'humification peut être envisagée. La présence de périodes sèches est, en effet, favorable à la polycondensation des substances humiques (Duchaufour et Jacquin, 1959 ; Kononova, 1961), ce qui leur confère une plus grande résistance à la minéralisation microbienne et au lessivage non négligeable dans le type de sol léger qui nous concerne (Jenkinson, 1977).

L'irrigation peut intervenir indirectement en modifiant la masse racinaire des cultures et, de ce fait, les quantités organiques restituées. Nous ne connaissons pas, dans nos conditions expérimentales, les relations entre l'irrigation et le développement

racinaire, il n'est pas possible de juger du sens dans lequel cet effet de l'irrigation pourrait intervenir.

L'augmentation des réserves organiques du sol pour les rotations interrompues par une culture de luzerne comparativement aux parcelles sans luzerne peut être interprétée selon deux processus :

— accumulation des résidus de racines sous culture de luzerne estimée à 70-180 q/ha en fonction du type de sol et des techniques de cultures (Kononova, 1961) ;

— réduction de la minéralisation dans les parcelles de luzerne « non travaillées » pendant 4 ans. Des auteurs signalent une augmentation de la matière organique du sol en culture sans labour (Blevins *et al.*, 1977) pouvant cependant ne résulter que de l'effet d'une redistribution des réserves organiques dans le profil (Monnier *et al.*, 1976).

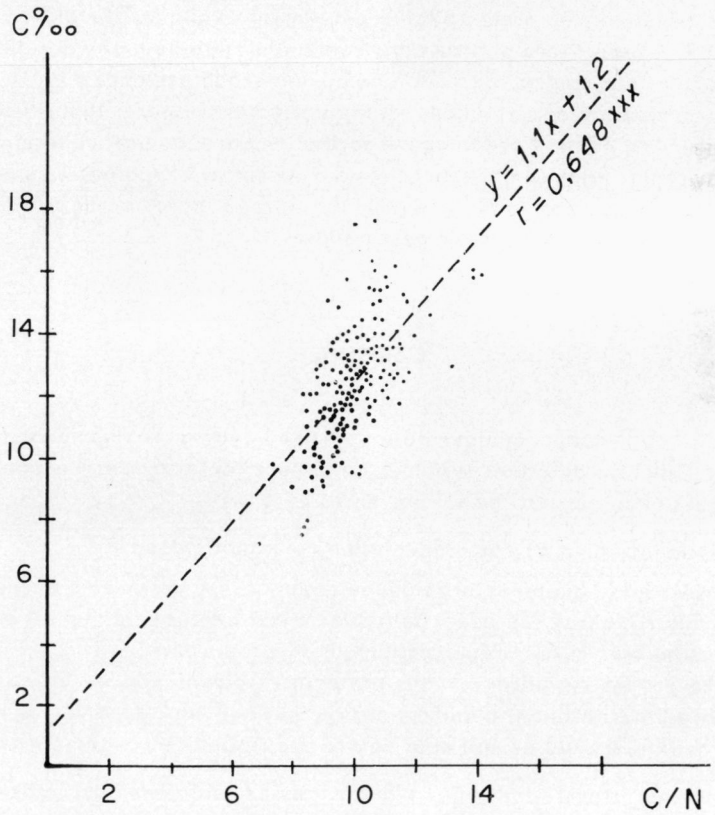


FIG. 1. — *Corrélation entre le rapport C/N et les teneurs en carbone.*
Relationship between C/N and soil carbon content

Les modifications du rapport C/N suggèrent une évolution au niveau de la qualité de la matière organique du sol. La matière organique libre est plus importante lorsqu'une luzernière intervient dans la rotation. Cette fraction, cependant, représente

des proportions faibles dont les variations n'ont qu'une incidence partielle dans les différences entre la matière organique totale et liée. Il n'est pas certain, par contre, que la totalité de la fraction organique libre soit extraite par la méthode utilisée. Ces considérations ainsi que l'échantillonnage restreint sur lequel ont porté les séparations densimétriques ne nous permettent pas de conclure quant à la signification des variations du rapport C/N que nous avons observées. Il est à remarquer que ces variations sont liées linéairement à celles du carbone ($r = 0{,}648$ pour 192 données, fig. 1) alors que la relation avec l'azote total est faible ($r = 0{,}139$).

La comparaison des teneurs en matière organique du sol des différentes rotations n'est réalisable qu'en absence de luzernière dans les successions de culture, l'effet luzerne masquant les différences entre rotations. La rotation intensive (maïs, pois + haricot, blé tendre d'hiver, orge) présente des réserves organiques très nettement supérieures à celles des rotations mixtes (maïs, pois, colza, blé tendre d'hiver) et céréalière (maïs, maïs, blé dur, orge). La présence de pois suivi de haricot et le supplément de restitution lié à ces cultures pourraient expliquer les différences qui se manifestent. Cet aspect sera abordé dans l'étude du bilan humique des différents systèmes de culture. Par contre, la rotation mixte, malgré la présence d'une légumineuse (pois) et de colza dont les restitutions sont importantes (Gouère, 1956), se caractérise par des teneurs en matière organique et surtout en carbone particulièrement faibles. On peut envisager, pour ce qui est des résidus de colza, l'hypothèse d'une valeur du coefficient isohumique plus faible que pour les autres cultures ou de restitutions racinaires inférieures à celles généralement admises.

Conclusion

L'examen du niveau organique du sol après 10 années d'expérimentation permet de dégager l'effet de différents systèmes de culture, de discerner l'action spécifique des techniques et successions de culture mises en œuvre.

Cette incidence peut être envisagée selon deux modalités :

— à travers les quantités organiques restituées. A ce niveau interviennent la nature des cultures qui se succèdent (quantité de restitutions organiques) ainsi que les techniques culturales et leur répercussion sur la production ;

— à travers les modifications des paramètres d'évolution de la matière organique du sol (minéralisation, humification) où seraient en cause les techniques de culture (irrigation, travail du sol) et la nature des restitutions organiques.

Un troisième aspect, dont nous n'avons pas pu tenir compte, concerne le rôle joué par la biomasse racinaire, son développement en relation avec les techniques culturales et la nature des cultures ainsi que son intervention dans l'évolution de la matière organique du sol.

L'étude du bilan humique des différents systèmes de culture devrait permettre de contrôler quelques-unes des hypothèses formulées ici.

Reçu pour publication en juin 1979.

Summary

Evolution of the soil organic matter in an experiment of rotation, irrigation and crop residues manuring in the Hardt plain

I. — *Level of the organic reserves*

The authors study the effect of different culture systems on the soil organic level after ten years experimentation on gravelly soil. In this trial six rotations including cereal crops, industrial crops, intensive and fodder (lucerne) crops are compared. The effects of irrigation and crop residues manuring are also tested. The soil contents in organic matter are evaluated from the analysis of carbon and total nitrogen.

The plots with straw manuring present a significantly higher organic level than that of the plots without ploughing in crop residues.

The irrigation obviously reduces the soil humic reserves.

The increase of the soil contents in organic matter in the presence of a leguminous plant is all the more important than its place in the rotation is preponderant.

The presence of a lucerne crop in the rotation is marked with a significant increase of the C/N ratio of the Soil whereas this same ratio is obviously lower in an irrigated culture. A fractionation of the free or linked organic matters brings only incomplete explanation elements.

Zusammenfassung

Evolution der organischen Substanz bei Fruchtwechselwirtschaft, Bewässerung, Strohzurückerstattung in der Hardtebene (Rheinebene)

1) *Stand der organischen Reserven des Bodens*

Nach 10 jährigem Versuch auf steinigem Boden, wurde der Einfluss verschiedener Anbausysteme auf den Gehalt an organischer Substanz des Bodens geprüft. Dieser Versuch vergleicht 6 Fruchtfolgen wo Getreide- und Futterbau (Luzerne), industrielle und intensive Kulturplanzen Hauptbestandteile waren. Ausserdem wurde der Einfluss der Bewässerung und der Ernterückstände untersucht. Durch die Bestimmung des Kohlenstoffes (Anne) und des Gesamtstickstoffes (Kjeldhal) wurde der Gehalt des Bodens an organischer Substanz festgestellt.

Die Versuchsparzellen auf welchen die Zurückerstattung des Strohes vorgenommen wurde, hatten einen wesentlich höheren Gehalt an organischer Substanz zu verzeichnen als die Parzellen ohne Ernterückstände.

Die Bewässerung verminderte merklich die Humusreserven des Bodens.

In Anwesenheit einer Hülsenfrucht ist die Humusgehaltsteigerung umso stärker, je überwiegender der Platz ist den diese Kultur in Mitte der Fruchtfolge einnimmt.

Des Vorhandensein einer Luzerne führt zu einer signifikanten Steigerung des C/N Verhältnisses ; bei bewässerten Kulturen hingegen sinkt dieses Verhältnis wesentlich ab. Eine Aufteilung in freie und gebundene organische Substanzen führte zu einer nur partiellen Erklärung.

РЕЗЮМЕ

Развитие органических веществ в почве опыта « севооборот, орошение, зарывание соломы » в равнине Гардта.

I. — Положение органических запасов.

ДЕЛЬФИН Ж. КОНЕСА А. П.

Авторы изучают влияние разных систем землепользования на органический уровень почвы после 10 лет опытов на кремнистой почве. Опыт сравнивает 6 севооборотов, включая зерновые, технические, интенсивные и кормовые /люцерна/ культуры. Кроме того изучается действие орошения и зарывания остатков урожая. Содержания органических веществ в почве определяются с помощью анализа углерода и общего азота.

Органический уровень участков с зарыванием соломы значительно выше чем уровень участков без зарывания остатков урожая.

Орошение заметно уменьшает запасы гумуса в почве.

Чем преобладающее место бобовых культур в севообороте, тем важнее увеличение содержания органических веществ в почве.

Присутствие люцерника в севообороте отличается значительным увеличением соотношения C/N, тогда как это соотношение заметно ниже в орошаемом земледелии. Разделение свободных и связанных органических веществ придаёт только частичное объяснение.

Références bibliographiques

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, **15,** 161-172.

ARSJAD S., GIDDENS J., 1966. Effect of added plant tissue on decomposition of soil organic matter under different wetting and drying cycles. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **30,** 457-460.

BLEVINS R. L., THOMAS G. W., CORNELINS P. L., 1977. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. *Agron. J.*, **69** (3), 383-386.

BOIFFIN J., SEBILLOTE M., 1975. Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement du maïs-grain. Analyse de 8 campagnes sur un essai de longue durée. *Ann. agron.*, **26** (5), 555-591.

BREMNER J. M., 1965. *Methods of soil analysis.* Editions C. A. Black.

DAGNELIE P., 1970. *Théorie et méthodes statistiques.* Vol. 2, Presses agronomiques de Gembloux, 451 p.

DEMOLON A., BURGEVIN H., 1940. Sur l'enfouissement direct des pailles de céréales dans le sol et ses répercussions. *Ann. agron.*, **10,** 357-365.

DOMMERGUES Y. et MANGENOT F., 1970. *Ecologie microbienne du sol.* Masson et Cie, Editeurs, Paris, 796 p.

DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1959. Note sur l'évolution de la matière organique dans les sols. *C. R. Acad. Agric.*, 516-519.

GOUÈRE A., 1956. *Résidus organiques laissés dans le sol par les différentes cultures. Bull. Assoc. fr. Etud. Sol,* **72,** 367-387.

GOUSSAULT Ch., 1976. *Résultats d'essais irrigation-rotation sur céréales.* Rapport de stage, 53 p.

JENKINSON D. S., 1977. Studies of the decomposition of plant material in soil. V. The effects of plant cover and soil type on the loss of carbon from ^{14}C labelled ryegrass decomposing under field conditions. *J. Soil Sci.*, **28,** 424-434.

MONNIER G., TURC L. et JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13** (1), 55-63.

MONNIER G., STENGEL P. et BODET J. M., 1976. Conséquences de la répartition des matières organiques sur le comportement du sol. Institut Technique Céréales et Fourrages, 7-8 décembre, 152-165.

PRATT P. F., GOULBEN B., HARDING R. B., 1957. Changes in organic carbon and nitrogen in an irrigated soil during 28 years of differential fertilisation. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **21,** 215-219.

SEBILLOTE M., 1975. Evolution des systèmes de culture et des moyens de production. *Cultivar*, 70-73.

SPECTY R., 1975. Etude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la Hardt irriguée. I. — Résultats partiels sur cultures de maïs grain. *Ann. agron.*, **26** (2), 169-197.

Ann. agron., 1979, **30** (2), 179-189.

Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles, dans la plaine de la Hardt

II. — Bilan humique

J. E. DELPHIN et A. Ph. CONÉSA

avec la collaboration technique de Christiane HUCK et Dominique MEYER

Station d'agronomie, Centre de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
28, *rue de Herrlisheim*, 68021 *Colmar*

Résumé

Les auteurs ont tenté de dégager, à partir des données du dispositif expérimental d'Algolsheim, l'incidence de quelques techniques et successions de culture sur l'évolution de la matière organique du sol : irrigation et restitution des résidus de récolte de six rotations (rotations céréalière, mixte céréales-cultures industrielles, ou comportant une culture intensive de pois suivi de haricot, chacune étant ou non interrompue par une luzernière de 4 ans).

Le stock organique du sol diminue pour les rotations sans luzerne : l'amplitude de ces variations semble en relation avec la productivité des rotations. La présence d'une luzernière dans les successions de culture maintient sensiblement les réserves organiques du sol à leur niveau de départ.

L'effet des successions de culture est modulé par l'incidence propre des techniques culturales.

Un modèle d'évolution des réserves organiques du sol tenant compte des conditions culturales est proposé. Sur ces bases sont estimés les coefficients de minéralisation apparent de l'humus ($0{,}023 \pm 0{,}007$ en culture non irriguée et $0{,}029 \pm 0{,}009$ en culture irriguée) ainsi que le coefficient isohumique ($K_1 = 0{,}17 \pm 0{,}047$) de l'ensemble des résidus de récolte d'une rotation.

Introduction

L'évolution des systèmes de culture est marquée depuis quelques années par l'extension des cultures céréalières. Cette tendance est particulièrement nette en Alsace, dans la plaine de la Hardt, où trois céréales prédominent : le maïs, le blé et l'orge. Il en résulte une simplification des rotations liée à la spécialisation céréalière des systèmes de production de la région, la part de cultures fourragères étant de plus en plus restreinte. La pratique de l'irrigation tend à se généraliser en raison des conditions pédoclimatiques régionales.

Le dispositif d'Algolsheim implanté dans la Hardt a pour objectif de comparer la productivité de rotations céréalières et de rotations pratiquées dans des systèmes de production plus diversifiés (Specty, 1975-1978). Les systèmes de culture comparés dans cet essai font intervenir des niveaux de restitutions organiques très différents ; aussi avons-nous été conduits à nous interroger sur le sens et la vitesse d'évolution de l'humus dans le sol.

Nous ne reviendrons pas sur les conditions expérimentales et les méthodes d'analyses utilisées qui ont été présentées dans une note précédente (Delphin et Conésa, 1979).

Bilan de la matière organique du sol

L'hétérogénéité du terrain nous a conduits à tenir compte de l'influence des cailloux et des graviers sur la densité apparente de la fraction fine.

Un repérage des zones caillouteuses a été réalisé à partir de photos aériennes. La densité apparente moyenne a été calculée au niveau de chaque sole en pondérant les mesures de densité apparente effectuées pour les différentes zones par leur surface respective. Simultanément, nous avons déterminé la profondeur de la couche arable associée aux densités apparentes mesurées. Nous disposons enfin des quantités de résidus de récolte restitués obtenues par pesage à la récolte, pour chaque parcelle (communication personnelle de Specty : tabl. 1).

TABLEAU 1

Productions annuelles de paille et de grains (moyennes sur 10 ans)
Annual crop yield of straw and grain

		Paille sèche (q/ha)		Grain sec (q/ha)	
		non irrigué	irrigué	non irrigué	irrigué
Maïs	rotations sans luzerne	35,1	43,3	37,1	58,1
	rotations avec luzerne	41,7	51,0	42,2	71,2
Blé dur		19,4	26,8	17,6	21,7
Orge de printemps	rotation céréalière	25,0	29,8	30,1	35,5
	rotation intensive	45,2	49,0	34,4	41,0
Pois		34,5	41,1	13,6	22,1
Haricot		26,9	29,9	11,8	13,1
Colza		40,4	47,4	11,8	17,3
Blé tendre d'hiver		49,7	60,9	34,3	46,6
Luzerne		75,0	98,3	—	—

Le bilan repose sur l'étude du carbone. Cette option s'explique par les difficultés d'appréhender les termes d'un bilan d'azote total dans les conditions expérimentales de notre essai et pour les sols filtrants concernés : l'absence de mesures sur cases lysimétriques ne nous permet pas d'estimer avec une précision convenable la contribution de l'azote minéral aux différentes entrées et sorties de ce bilan.

TABLEAU 2

Eléments du bilan de la matière organique de la couche arable en fonction des systèmes de culture

Soil organic matter balance sheet of the cultivated layer in relation with cropping systems

			Poids moyen de la fraction fine (t/ha)	1966 matière organique du sol (1) (t/ha)	1976 matière organique du sol (t/ha)	Variation des réserves organiques (t/ha)	1966 à 1976 Restitutions (2) (t/ha)
Rotation céréalière	Irrigué *Sans luzerne*	pailles restituées	2 000	47,0	39,3	— 7,7	30,9
		pailles exportées			35,2	— 11,8	
	Non irrigué	pailles restituées	2 000	44,8	41,0	— 3,8	25,9
		pailles exportées			35,8	— 9,0	
	Irrigué *Avec luzerne*	pailles restituées	2 200	53,0	50,8	— 2,2	18,8
		pailles exportées			47,7	— 5,3	
	Non irrigué	pailles restituées	2 200	50,6	52,8	+ 2,2	14,5
		pailles exportées			49,5	— 1,1	
Rotation mixte	*Sans luzerne*	Irrigué	2 100	47,9	41,0	— 6,9	44,5
		Non irrigué			36,1	— 8,8	38,2
	Avec luzerne	Irrigué	2 200	49,7	49,5	— 0,2	24,5
		Non irrigué			52,1	+ 2,4	20,5
Rotation intensive	*Sans luzerne*	Irrigué	2 100	46,8	44,5	— 2,3	53,4
		Non irrigué			46,6	— 0,2	46,8
	Avec luzerne	Irrigué	2 100	51,3	54,5	+ 3,2	29,6
		Non irrigué			54,7	+ 3,4	25,0

(1) Matière organique d'après C × 1,72.
(2) Evaluée d'après le poids de matière sèche des récoltes (105°).

Résultats et discussion

Le tableau 2 rassemble, pour chaque rotation, les résultats moyens concernant le sens de l'évolution des réserves organiques du sol en fonction des différents traitements.

a) *Sens d'évolution du stock organique.*

On assiste pour les rotations sans luzerne, à une diminution du stock d'humus ; le déficit est cependant moindre pour la rotation intensive (maïs, pois suivi de haricot, blé tendre d'hiver et orge de printemps) par rapport à la rotation céréalière (maïs, blé dur et orge de printemps) et mixte (maïs, pois, colza, blé d'hiver). L'intercalation d'une luzernière de 4 ans dans les successions de cultures occasionne un bilan organique positif pour la rotation intensive et légèrement déficitaire ou bénéficiaire pour les deux autres. Les incidences liées à la nature des rotations sont, en effet, modulées par les techniques de culture dans un sens que nous avons déjà décrit. On peut remarquer que l'accroissement de production aérienne dû à l'irrigation (20 p. 100 environ) ne compense pas son incidence directe sur la minéralisation des matières organiques du sol.

Si l'on s'en tient aux rotations sans luzerne pour lesquelles les variations des réserves organiques du sol ne sont pas masquées par l'effet de la luzernière, le bilan humique est négatif. Ce déficit et les niveaux de restitutions organiques sont différents selon les rotations. Aussi avons-nous tenté de relier les variations des réserves organiques du sol, pour chaque rotation, aux différences de quantités de résidus de récolte restitués.

b) *Comparaison des bilans par rotation.*

La comparaison des traitements enfouissement-exportation des fanes et pailles, en rotation céréalière sans luzerne, permet d'établir le coefficient isohumique moyen des restitutions organiques sur 10 ans ; nous admettons dans ce cas que les différences du niveau humique résultent de l'effet des seules restitutions. Le coefficient isohumique moyen estimé sur cette base est de 0,17 $\pm$ 0,047 (moyenne de huit valeurs). Les différences de restitutions, affectées du coefficient isohumique précédent, fournissent une estimation des écarts théoriques des réserves humiques entre les rotations parcelles irriguées et non irriguées confondues (tabl. 3).

Ces résultats distinguent très nettement la rotation mixte des rotations intensive et céréalière. Pour ces dernières, les variations des réserves organiques sont de l'ordre de grandeur des différences de restitutions. Nous ne tenons pas compte dans cette comparaison des restitutions organiques racinaires. Il semble donc que les quantités de pailles ou fanes enfouies contribuent fortement à la différenciation du bilan humique des rotations céréalières et intensives.

Le niveau humique de la rotation mixte, par contre, est sans rapport avec les quantités de résidus de récolte restituées. Il semble que le coefficient isohumique adopté surestime le rendement humique réel du colza ; cette culture est la seule à ne pas figurer dans les autres rotations. La diminution des coefficients isohumiques ne fournirait qu'une explication partielle des faits observés ; des variations entre les masses raci-

TABLEAU 3

Bilan de la matière organique du sol (t/ha) : *comparaison entre rotations des différences de bilans et de restitutions affectées au rendement isohumique* $K_1 = 0,17$

RC = rotation céréalière sans luzerne
RM = rotation mixte sans luzerne
RI = rotation intensive sans luzerne

Balance sheet of soil organic matter : comparison of organic balance differences and straw ploughed in differences between rotations

	RI — RC	RI — RM	RM — RC
Variations de bilan	4,5	6,6	— 2,1
Variations des restitutions	3,7	1,5	2,2

naires des différentes rotations pourraient être en cause. Il n'est cependant pas possible, dans nos conditions expérimentales, de contrôler ces hypothèses.

Compte tenu de ces résultats, si on fait abstraction du cas particulier de la culture de colza, on peut estimer qu'une rotation sans luzerne fournissant par an 50 q/ha de résidus de récolte en culture non irriguée et 70 q/ha sous irrigation, suffirait à assurer un état d'équilibre des réserves organiques du sol, dans nos conditions écologiques.

Ces éléments du bilan humique permettent de mettre en lumière l'incidence des techniques culturales et des rotations sur le sens de l'évolution de la matière organique du sol. Par la suite, nous avons tenté de déterminer la vitesse de ces processus afin de posséder des références, dans les conditions pédoclimatiques de l'essai, sur les coefficients de minéralisation et d'humification de la matière organique.

c) *Paramètres d'évolution de la matière organique du sol.*

Nous avons calculé précédemment le coefficient isohumique apparent des résidus de récolte de la rotation céréalière. Cette estimation assez grossière ne tient pas compte de la minéralisation de la matière organique formée à partir des restitutions ni du fait que les enfouissements, variables en quantités, sont échelonnés dans le temps. Il nous semble intéressant d'estimer les coefficients d'humification et de minéralisation en tenant compte de l'étalement des restitutions. Nous nous limitons à la rotation céréalière stricte, seule rotation pour laquelle les traitements enfouissement et exportation des pailles interviennent.

Cette estimation utilise le modèle d'évolution de la matière organique du sol partant de l'équation différentielle de premier ordre (Hénin et Dupuis, 1945) :

$$dy = (K_1 A - K_2 y)\, dt$$

y = teneur en matière organique du sol (en p. 100),
K_1 = coefficient isohumique,
K_2 = coefficient de minéralisation,
A = restitutions annuelles (en p. 100 de terre fine de la couche arable),
t = durée (année).

Certains modèles tiennent compte de la diversité des matières organiques du sol et de leur vitesse de dégradation : matière organique libre et liée (Hénin *et al.*, 1959). Les quantités de matière organique libre étant négligeables dans notre cas (tabl. 4), nous avons adopté le modèle le plus simple décrit par Hénin et Dupuis prenant en

TABLEAU 4

Rotation céréalière sans luzerne : matière organique libre (exprimée en carbone p. 1 000) *en fonction des traitements*

Cereal rotations without lucerne : relation of free soil organic matter (C p. 1 000) *to treatments*

	Sans irrigation		Avec irrigation	
	résidus non enfouis	résidus enfouis	résidus non enfouis	résidus enfouis
M. O. libre	0,20	0,24	0,20	0,25
M. O. libre/M. O. totale (p. 100) ...	2,2	2,3	2,1	2,3

compte la matière organique totale. Afin d'intégrer la variabilité dans le temps des restitutions et l'évolution ultérieure des résidus humifiés, nous avons apporté quelques modifications dans l'utilisation du modèle précédent.

Coefficient de minéralisation.

Le coefficient de minéralisation tel qu'il est défini dans l'équation précédente se rapporte à l'humus et ne peut être directement établi qu'en sol nu. En présence d'une culture, la détermination du paramètre de minéralisation de l'humus se heurte à trois difficultés principales liées à la présence dans le sol de la biomasse racinaire :

— la difficulté d'estimer la masse de racines d'une culture,

— le manque de références concernant la dynamique de transformation de cette biomasse dans le sol,

— le peu de connaissances relatives à l'incidence du système racinaire sur l'évolution de l'humus par l'intermédiaire des micro-organismes de la rhizosphère.

Aussi, le coefficient de minéralisation apparent que nous avons déterminé prend en compte la dégradation de l'humus *sensus stricto* ainsi que l'humification de la biomasse racinaire.

Le développement de la relation précédente conduit à l'expression des teneurs en matière organique :

$$y = \frac{K_1 A}{K_2} (1 - e^{-K_2 t}) + y_0 e^{-K_2 t}$$

y_0 = teneur en matière organique du sol au début de l'essai.

En considérant nulles les restitutions racinaires, ce qui revient à inclure l'évolution de leur substance organique dans le coefficient de minéralisation apparent, la relation s'écrit :

$$y = y_0 e^{-K_2 t} \text{ soit } K_2 = \frac{\text{Log } (y_0/y)}{t} .$$

Les valeurs du coefficient de minéralisation ainsi établies figurent dans le tableau 5. Elles sont supérieures à celles généralement établies (Anstett, 1962 ; Hénin *et al.*, 1960 ; Morel, 1974) et à celle estimée par la formule empirique faisant intervenir les teneurs en argile et en calcaire du sol (Rémy, Marin-Laflèche, 1972)

$$K_2 = \frac{1\,200}{(A + 200)\,(C + 200)} = 0{,}017$$

A = taux d'argile en p. 1000,
C = taux de calcaire en p. 1000.

TABLEAU 5

Rotation céréalière sans luzerne (parcelle sans restitutions) : *teneur initiale et finale en matière organique, coefficient de minéralisation apparent*

Cereal rotation without lucerne (no straw ploughed in) : *initial and final soil organic matter content and apparent mineralisation coefficient*

		Sole b_1	Sole c_1	Sole d_1	Sole e_1	Moyennes
Parcelles non irriguées	M. O. (p. 100) 1966 .	2,28	2,53	2,11	2,05	
	M. O. (p. 100) 1976 .	1,84	1,92	1,58	1,81	
	K_2.....	0,021	0,028	0,029	0,013	0,023 ± 0,007
Parcelles irriguées	M. O. (p. 100) 1966 .	2,42	2,53	2,33	2,13	
	M. O. (p. 100) 1976 .	1,87	1,76	1,63	1,78	
	K_2.....	0,026	0,036	0,036	0,018	0,029 ± 0,009

Les conditions pédo-climatiques locales, sols légers et caillouteux, climat continental, peuvent expliquer les différences observées. La comparaison par la méthode des paires des coefficients de destruction apparente de l'humus du sol fait ressortir une différence hautement significative entre les parcelles irriguées et non irriguées. Ainsi établi, le coefficient de minéralisation représente la résultante entre la minéralisation nette de la matière organique du sol et de l'humification des résidus de racines et chaumes. Ces valeurs sous-estiment la minéralisation réelle des substances humiques. Ce paramètre, obtenu à partir des parcelles où les pailles sont exportées, est utilisé pour le calcul du coefficient isohumique des résidus de récolte, dans le cas des parcelles avec restitution des pailles. Nous considérons, de ce fait, que les rendements ne sont pas modifiés par l'enfouissement des pailles, ce qui est vérifié pour les parties aériennes (Specty, 1975).

Coefficient isohumique.

Pour tenir compte de l'étalement dans le temps des restitutions de résidus de culture, nous avons cumulé sur la durée de l'essai l'évolution annuelle de la matière organique stable et des apports.

Le raisonnement est le suivant :

Première année après l'enfouissement :

$$y_1 = \frac{(K_1 A_1)}{K_2} (1 - e^{-K_2}) + y_0 e^{-K_2}.$$

Seconde année :

$$y_2 = \frac{K_1 A_2}{K_2} (1 - e^{-K_2}) + y_1 e^{-K_2}$$

$$= \frac{K_1}{K_2} (A_2 + A_1 e^{-K_2}) (1 - e^{-K_2}) + y_0 e^{-2K_2}$$

en généralisant à la n-ième année :

$$y_n = \frac{K_1}{K_2} (1 - e^{-K_2}) \sum_{i=1}^{n} A_i e^{-(n-i)K_2} + y_0 e^{-nK_2}$$

A_i restitutions de la ième année exprimées en matière organique p. 100 de la terre fine pour la couche arable (35 cm),

E étant le vecteur colonne des $e^{-(n-i)K_2}$, i variant de 1 à n,

R étant le vecteur ligne des restitutions successives ;

on a en représentation matricielle :

$$y_n = y_0 e^{-nK_2} + \frac{K_1}{K_2} (1 - e^{-K_2}) \text{ R.E.}$$

d'où

$$K_1 = \frac{K_2(y_n - y_0 e^{-nK_2})}{(1 - e^{-K_2}) \text{ R.E.}}.$$

Ce modèle est appliqué à la détermination du coefficient isohumique des résidus de récolte restitués pour la rotation céréalière stricte irriguée et non irriguée. Nous supposons que le coefficient d'humification des pailles et fanes est le même pour toutes les céréales. Les résultats sont établis pour les différentes parcelles affectées du coefficient de minéralisation qui leur est associé et des restitutions annuelles exprimées en p. 100 de la fraction fine (tabl. 6).

TABLEAU 6

Rotation céréalière sans luzerne (parcelles avec restitutions) : *restitutions sur* 10 *ans, teneurs initiales et finales en matière organique, coefficient isohumique*

Cereal rotation without lucerne (straw ploughed in) : *amount of straw ploughed in during* 10 *years, initial and final soil organic matter content and isohumic coefficient*

		Sole b_1	Sole c_1	Sole d_1	Sole e_1	Moyennes
Parcelles non irriguées	restitutions (t/ha)	29,8	31,5	23,8	23,5	
	M. O. (p. 100) 1966 ...	2,28	2,53	2,11	2,05	
	M. O. (p. 100) 1976 ...	2,19	2,14	1,79	2,07	
	K_1.....	0,29	0,16	0,22	0,26	0,24 ± 0,08
Parcelles irriguées	restitutions (t/ha)	38,9	35,1	27,4	28,4	
	M. O. (p. 100) 1966 ...	2,42	2,53	2,23	2,13	
	M. O. (p. 100) 1976 ...	2,06	2,07	1,87	1,92	
	K_1.....	0,12	0,22	0,23	0,12	0,17 ± 0,06

Les valeurs du coefficient isohumique que nous obtenons sont élevées mais se situent dans la gamme des variations citées par la littérature (Muller, 1966 ; Hénin *et al.*, 1960). Signalons que les restitutions sont accompagnées d'un apport de 50 kg d'azote par hectare ce qui peut expliquer les valeurs du rendement humique que nous avons établies. D'autre part le mode de calcul utilisé, faisant intervenir la minéralisation ultérieure de l'humus formé, fournit des valeurs plus élevées.

Le modèle adopté, par sa conception, nous paraît adapté à l'évolution de la matière organique du sol dans les systèmes de culture : il tient compte de la périodicité des restitutions et peut intégrer des variations du coefficient isohumique des différents apports organiques et du coefficient de minéralisation. Dans notre cas, la durée restreinte de l'essai, l'hétérogénéité du sol, l'échantillonnage (particulièrement en début d'essai) et les mesures de carbone constituent des sources d'erreurs ne nous permettant pas de cerner avec une grande précision les valeurs des paramètres d'évolution de la matière organique du sol.

Conclusion

Nous avons tenté de dégager, à travers l'étude du dispositif expérimental d'Algolsheim, l'incidence des composantes de différents systèmes de culture sur l'évolution de la matière organique du sol.

La productivité des cultures qui se succèdent constituent le principal facteur intervenant sur le niveau organique du sol et son évolution. Cependant, les modifications de milieu (irrigation) ou la nature des restitutions organiques, peuvent intervenir. Les difficultés d'appréhender le rendement de la biomasse racinaire ne permettent pas souvent de discerner la part due à l'un ou l'autre de ces effets.

Un modèle d'évolution des réserves organiques du sol, établi à partir de celui de Hénin et Dupuis, se propose d'adapter la cinétique de la matière organique du sol aux conditions culturales. Nous avons pu, à partir de ce modèle, estimer le coefficient de minéralisation apparent de l'humus ainsi que le coefficient isohumique des restitutions céréalières.

L'ensemble de ces résultats constitue des éléments de référence, à l'échelle régionale, dans le choix de successions de cultures, du niveau de production devant être atteint et de techniques culturales propres à assurer la stabilité du stock organique du sol à un niveau satisfaisant.

Reçu pour publication en mai 1979.

Remerciements

Nous tenons à remercier MM. Just (Station d'agronomie I.N.R.A. de Bordeaux) et Morel (Chaire de Science du Sol, I.N.A. Paris-Grignon) pour les remarques et les corrections qu'ils ont apportées à la rédaction du présent mémoire (1re et 2e parties).

Summary

Evolution of the soil organic matter in an experiment of rotation, irrigation and crop residues manuring in the Hardt plain

II. — *Humic balance*

The authors try to find out from the data obtained with the Algolsheim experimental device the effect of some cultural techniques and crop rotations on the evolution of the soil organic matter : irrigation and crop residues manuring after six rotations (cereal rotation, cereal and industrial crop rotation or rotations including an intensive pea culture followed by a bean culture, each being or not interrupted by a lucerne field of 4 years).

The soil organic reserve decreases for the rotations without lucerne : the variation range seems to be related with the rotation yield. The presence of a lucerne field in crop rotations maintains the soil organic reserves at their initial level.

The effect of crop rotation is modified by the effect peculiar to the cultural techniques.

A model of evolution for the soil organic reserves accounting for the cultural conditions is proposed. The apparent mineralization coefficients of humus are estimated on these bases (0,023 $\pm$ 0.007 in non-irrigated cultures and 0,029 $\pm$ 0,009 in irrigated ones) as well as the isohumic coefficient (KI = 0,17 $\pm$ 0,047) of the whole crop residues of a rotation.

Zusammengassung

Evolution der Organischen Substanz des Bodens bei einem Versuch, über Fruchtwechselwirtschaft mit Bewässerung und Strohzurückerstattung, in der Hardtebene (Rheinebene)

II. — *Humushaushalt*

Im Rahmen der Versuchserie von Algolsheim, wurde das Einwirken verschiedener Anbautechniken und Fruchtfolgen auf die Evolution der Organischen Substanz des Bodens untersucht. Mann verglich Bewässerung und Zurückerstattung der Ernterückstände von 6 Fruchtwechselwirtschaften (reine Getreidefruchtfolge, Getreide und industrielle Kultur, Einfügung einer intensiven Erbsen- und Bohnenkultur ; jede dieser Wechselwirtschaften war, oder nicht, durch 4 Jahre Luzerneanbau unterbrochen).

Die Humusreserven nahmen bei allen Fruchtfolgen ohne Luzerneanbau ab, das Ausmass dieser Schwankungen scheint in Verbindung mit der Produktivität der Fruchtfolgen zu sein. Das Einfügen einer Luzerne in die Fruchtfolgen ermöglichte den Humusanfangsgehalt des Bodens zu erhalten.

Der Fruchtfolgeeffekt wird durch das spezifische Einwirken der Anbauteckniken beeinflusst.

Ein Umsetzungsmodel der organischen Bodenreserven wird im Zusammenhang mit den ackerbaulichen Massnahmen vorgeschlagen. Auf dieser Basks wurde der scheinbare mineralisierungskoeffizient des Humus bestimmt (2,9 p. 100 unter Bewässerung, 2,3 p. 100 ohne Bewässerung), sowie der « Humusbildungskoeffizient » (coefficient isohumique = 17 p. 100) der gesammten Ernterückstände einer Fruchtfolge.

РЕЗЮМЕ

Развитие органических веществ в почве опыта « севооборот, орошение, зарывание соломы » в равнине Гардта.

II. — Баланс гумуса.

ДЕЛЬФИН Ж. КОNECA А. П.

С помощью данных полученных в опытной станции Альгогьшейна, авторы пытались показать влияние некоторых агролриеиов и севооборотов на развитие органических веществ в почве : орошение и зарывание остатков урожая щести севооборотов /зерновой севооборот,

смешанный севооборот включая зерновые и технические культуры или интенсивное возделывание гороха и фасоли, люцерник прерывая, или нет, каждый севооборот в течение 4 лет/.

Запасы органических веществ в почве уменьшаются в севооборотах без люцерны : по-видимому, объём этих отклонений зависит от производительности севооборотов. Присутствие люцерника приблизительно сохраняет органические запасы в почве на начальном уровне.

Собственное влияние агроприёмов модулирует действие севооборотов.

Предлагается модель развития органических запасов в почве, которая учитывает условия возделывания. На этой основе оцениваются коэффициенты видимой минерализации гумуса /0,023 $\pm$ 0,007 в неорошаемом земледелии и 0,029 $\pm$ 0,009 в орошаемом земледелии/ и изогумусовый коэффициент /$K_1 = 0{,}17 \pm 0{,}047$/ всех остатков урожая севооборота.

Références bibliographiques

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, **15,** 161-172.

ANSTETT A., 1962. Niveau humique des sols en culture léguminière. *Bull. techn. Inform.*, **175,** 1026-1041.

DELPHIN J.-E., CONESA A. Ph., 1979. Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotation, irrigation, restitution des pailles dans la plaine de la Hardt. I. Etat des réserves organiques. *Ann. agron.*, **30** (2), 167-178.

GRAS R., 1969. Les mesures de densité apparente en sol caillouteux. *Bull. Assoc. fr. Etud. Sol*, 9-11.

HÉNIN S., MONNIER G., TURC L., 1959. Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **248,** 138-141.

HÉNIN S., DUPUIS M., 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. agron.*, **5,** 17-29.

HÉNIN S., FÉODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural*, S. E. I. A. Paris, 320 p.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13** (1), 55-63.

MOREL R., 1976. Utilisation des résultats obtenus sur des essais de longue durée dans l'étude des transferts de l'azote dans le sol. *Ann. agron.*, **27** (5-6), 567-582.

MULLER J., 1966. Observation sur les essais à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen. II. Action sur le bilan de l'azote total du sol. *Ann. agron.*, **17** (1), 21-26.

RÉMY J. C., MARIN-LAFLÈCHE A., 1974. L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Ann. agron.*, **25** (4), 607-632.

SPECTY R., 1975. Etude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la Hardt irriguée. *Ann. agron.*, **26** (2), 169-197.

SPECTY R., 1978. Etude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la Hardt irriguée. II. Résultats partiels sur cultures de luzerne. *Ann. agron.*, **29** (1), 89-106.

Ann. agron., 1979, **30** (2), 191-211.

Études préliminaires des effets de l'insertion du soja dans les rotations céréalières

J-R. MARTY et A. HILAIRE *

avec la collaboration technique de Nicole BOSC, M. DABASSE et B. DAGOU

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches Agronomiques de Toulouse, I. N. R. A.,
Auzeville, 31320 Castanet Tolosan

* *Chambre Départementale d'Agriculture de la Haute-Garonne, S. U. A. D.,*
61, allée de Brienne, 31000 Toulouse

Résumé

Une culture de soja a été introduite en deux rotations céréalières : monoculture irriguée de sorgho pendant 6 ans et succession maïs irrigué-blé. Nous avons contrôlé la production de soja et ses arrière-effets par comparaison aux deux autres précédents, maïs et sorgho, de chacune des rotations.

Le soja s'est bien comporté en ces deux rotations, quoique son rendement ait été inférieur de 3,9 q/ha après monoculture irriguée de sorgho.

Les arrière-effets du soja se retrouvent à la fois sur le sol (effet physique) et sur le comportement d'un blé d'hiver implanté derrière soja dans les deux rotations (effet azote) :

Les effets sur le sol sont fugaces et difficiles à mettre en évidence. Les profils culturaux montrent des modifications de la structure, notamment de celle plus dégradée obtenue après monoculture irriguée de sorgho. Il n'y a effet favorable du précédent soja sur le semis du blé d'hiver que s'il peut être réalisé en terre encore sèche.

L'effet azote du précédent soja sur le blé d'hiver est très net. On le retrouve sur la croissance et de développement du blé : tallage, nombre de grains au m^2, poids de mille grains, production de paille et de grains ainsi que sur les quantités d'azote absorbées par la culture. Les courbes de réponse à la fumure azotée, d'après la production de matière sèche et la quantité d'azote contenue dans les parties aériennes permettent de classer les différents précédents, et montrent l'effet favorable du précédent soja, même si par suite d'échaudage ou de maladies, on n'aboutit pas à des productions de grains nettement plus élevées.

L'équivalent azote du précédent soja sur blé d'hiver varie selon la rotation : de quelques kilos/ha d'azote en rotation maïs irrigué -blé à 70 kg/ha d'azote en monoculture irriguée de sorgho.

Introduction

Les rotations traditionnelles en système céréalier posent des problèmes de structure des terres et de gestion de la fumure azotée dus, en grande partie, à la disparition des prairies à base de légumineuse (Malterre, 1956).

On peut améliorer le fonctionnement des rotations céréalières par l'insertion de légumineuses annuelles à graines commercialisables : pois, féveroles, soja (Marty *et al.*, 1977).

Dans les conditions du Sud-Ouest de la France se pose actuellement le problème de l'introduction du soja en système céréalier. Des études ont été entreprises pour préciser les possibilités de production du soja dans de tels systèmes et son apport en tant que précédent pour la céréale d'hiver qui suit.

I. — Conditions expérimentales

La culture du soja a été introduite :

— soit pour rompre une monoculture de sorgho irrigué depuis 6 ans ;

— soit dans une rotation maïs irrigué-blé en remplacement de la culture de maïs.

Il y avait donc deux étapes expérimentales successives conduites sur un sol de topographie plane, formé sur alluvions fluviatiles récentes, correspondant à un sol brun limono-argileux, peu évolué et profond sur sous-sol plus argileux, possédant un pouvoir alimentaire satisfaisant en P_2O_5 et K_2O (particules inférieures à 0,002 mm : 284 p. 1 000, capacité d'échange cations : 175 meq par kg de terre, matières organiques totales : 14,8 p. 1 000, rapport C/N = 7,75).

A. — *Insertion d'une culture de soja en rotation céréalière*

La 1re *étape* a débuté au printemps 1975 où fut implantée sur une partie de chacune de ces rotations une culture de soja variété Amsoy 71 ; l'autre partie suivant le cours normal de la rotation : soit sorgho variété INRA 450, soit maïs variété INRA 400.

Chacune de ces cultures est conduite de manière classique :

— fumure phosphopotassique gérée au niveau de la rotation par restitution des quantités exportées de la parcelle après un enrichissement initial,

— fumure azotée : 120 kg d'azote sur blé, 150 sur sorgho, 200 sur maïs, soit en moyenne annuellement au niveau de la rotation, respectivement 150 (sorgho continu) et 160 (maïs-blé), donc sensiblement comparables. Le soja reçoit 20 kg/ha d'azote localisés au semis, les graines sont inoculées par *Rhizobium Japonicum* souche G3,

— irrigation : dans ce type de sol profond et à fortes réserves hydriques, l'irrigation a pour but de satisfaire les besoins en eau pendant la phase sensible du sorgho : épiaison, floraison, formation du grain (Langlet, 1973), la période critique du maïs : inflorescence mâle, flétrissement des soies (Robelin *et al.*, 1958), la période de formation des gousses du soja (Mingeau, 1974 ; Puech, 1977). Pour 1975, compte tenu des conditions climatiques (tabl. 1), les irrigations ont apporté en quatre interventions chacune : 160 mm sur sorgho, 180 mm sur maïs, 140 mm sur soja,

— densité en nombre de plantes/ha : maïs 80 000, soja 300 000, sorgho 600 000,

— désherbage : atrazine et propachlore sur sorgho, simazine et atrazine sur maïs, nitrofène, 2-4 D et 2-4 MCPA sur blé, linuron et alachlore sur soja.

B. — *Etude de l'arrière-effet du soja sur une culture de blé d'hiver*

La deuxième étape a consisté à implanter après ces trois cultures irriguées un blé d'hiver (variété Top) à l'automne 1975. Sur les deux rotations et pour chacun des pré-

TABLEAU 1

Principaux caractères climatiques obtenus sur le parc climatique INRA-Auzeville. Evapotranspiration potentielle mesurée sous fétuque Manade

Principal climatic characteristics of INRA-Auzeville location. Potential evopotranspiration measured under Festuca arundinacea

	1975								
	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
ETP (fétuque manade) (mm)	60	124	122	177	144	90	68	31	15
Pluie (mm)	36	122	44	22	102	51	35	118	20
Déficit hydrique (—) ou excédent (+) (mm) ...	— 24	— 2	— 78	— 155	— 42	— 39	— 33	+ 87	+ 5

	1976						
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
ETP (fétuque manade) (mm)	17	25	58	80	105	185	199
Pluie (mm)	21	25	47	82	45	0	34
Déficit hydrique (—) excédent (+) (mm)	+ 4	0	— 11	+ 2	— 60	— 185	— 165

cédents, quatre doses d'azote (40, 80, 120, 160 kg/ha) et un témoin (0 N) ont été comparées (trois répétitions). Quel que soit le niveau de fumure, l'application a été faite en deux fois, sous forme d'ammonitrate : le 20/1 avant tallage pour 2/3 de chaque dose, le 7/4 à la montaison pour le 1/3 restant.

Les successions de cultures expérimentées sont résumées ci-dessous :

Années	Rotation			
	Monoculture de sorgho irriguée		Maïs irrigué-blé	
1969		sorgho		maïs
1974		sorgho		blé
1975		sorgho	soja	maïs	soja
	date semis	7/5	28/4	23/4	28/4
	date récolte	8/10	30/10	9/10	30/10
1976		blé	blé	blé	blé
	date semis	26/11	26/11	26/11	26/11
	date récolte	9/7	9/7	9/7	9/7

Les contrôles réalisés au cours de ces deux étapes portèrent sur :

— l'état du sol,

TABLEAU 2

Description des profils culturaux
Description of cultural profiles

	« Rotation » Sorgho continu irrigué		« Rotation » Maïs irrigué-Blé	
	Sous Sorgho 7e année	Sous Soja	Sous Maïs	Sous Soja
Mai 1975	0-5/7 cm : structure polyédrique, légère semelle à 5/7 cm avec structure lamellaire 5-30/35 cm : très humide, gley intense autour des tiges enfouies de sorgho. Quelques cavernes en fond de labour Structure à tendance continue. Compact 30/35 cm : humide et compact		0-5 cm : structure polyédrique de faible cohésion, légère semelle à 5 cm avec tendance à structure lamellaire 5-35 cm : très humide, gley par plaque, structure polyédrique-caverneux en fond de labour 30-35 cm : horizon compact, humide, structure continue	
Octobre 1975 .	0-7 cm : horizon meuble, structure grumeleuse, enracinement de sorgho important sur la ligne et franchissant bien la semelle 7-35 cm : horizon nettement compact, sans fente de retrait. Tiges de sorgho avec gley. Fines radicelles 35 cm : enracinement faible qui franchit difficilement la zone compacte du fond de labour	0-10/15 cm : structure nettement grumeleuse, de faible cohésion. Horizon très meuble. Enracinement important avec nombreuses nodosités. Structure à tendance lamellaire horizontale à 10-15 cm 10/15-35 : structure massive continue avec fentes de retrait. Nombreuses mottes compactes non explorées par les racines. Gley par tache entre 10 et 20 cm, nombreuses racines autour des mottes et descendant au-delà de 35 cm	0-5 cm : structure grumeleuse sur ligne, compact interligne, enracinement horizontal à 7 cm 5-35 cm : structure polyédrique-horizon compact et sain avec peu de trace d'hydromorphie. Enracinement abondant dans fente de retrait 35 cm : fines radicelles qui descendent dans minces fentes de retrait	1-10/15 cm : structure polyédrique à grumeleuse, plus compact qu'après sorgho, nombreuses nodosités. Tendance horizontale des racines à 15 cm 10/15-35 cm : structure polyédrique. Très bonne colonisation par racines de soja. Très peu d'hydromorphie qui se manifeste seulement par de très légères taches 35 cm : horizon compact, assez bien colonisé par de nombreuses radicelles

— les productions, exportations et restitutions comparées des cultures de maïs, de sorgho et de soja,

— les conditions d'implantation du blé après soja, sorgho, maïs,

— la croissance et la nutrition azotée du blé,

— la production et les composantes du rendement du blé.

Le traitement statistique des données a été effectué par comparaison des moyennes après analyse de variance à un ou plusieurs facteurs.

II. — Résultats

A. — *Effets globaux de l'insertion du soja en système céréalier*

1) *Contrôles de l'état du sol.*

En début de culture (mai 1975), les sols des deux rotations se différenciaient :

— par une densité apparente (Maertens, 1965) plus élevée en monoculture irriguée de sorgho qu'en rotation maïs-blé (1,69 en sorgho continu pour 1,64 en maïs irrigué-blé, significatif à $P = 0{,}10$, ppds 0,02),

— par une structure à tendance continue et un horizon compact et très hydromorphe en monoculture irriguée de sorgho, alors qu'en rotation maïs-blé la structure était mieux construite avec des zones moins compactes et une hydromorphie plus légère (tabl. 2).

En fin de culture (octobre 1975), on pouvait constater (tabl. 2) :

— un ameublissement des 10 à 15 premiers cm, notamment après sorgho, avec une structure nettement grumeleuse de faible cohésion. Cet important effet de granulation a été observé par ailleurs (Ronsin, 1976),

— une colonisation racinaire importante du soja sur les 40 premiers cm après maïs, alors, qu'après sorgho, seuls les 15 premiers cm possèdent un fort enracinement avec, au-dessous, de grosses mottes non colonisées par les racines,

— dans les deux rotations, le soja présentait une nodulation satisfaisante.

2) *Rendement comparé des trois cultures : maïs, sorgho, soja.*

En condition irriguée, les résultats montrent que (tabl. 3) :

— après 7 ans de monoculture irriguée, on obtient une production relativement faible du sorgho,

— dans la rotation « maïs-blé », la production de maïs est d'un bon niveau,

— le soja fournit un rendement graine de 34,4 q/ha après blé de la rotation maïs-blé et un rendement inférieur de 3,9 q/ha lorsqu'il est introduit en monoculture de sorgho irrigué.

Bien que la densité réelle en pieds de soja soit inférieure après sorgho (cent quatre-vingt-dix-sept mille pieds/ha pour trois cent mille graines semées) à celle obtenue après maïs (deux cent cinquante-quatre mille pieds/ha), on ne peut attribuer uniquement la différence de rendement à la différence de peuplement. Il a été montré que le rendement du soja varie peu pour des différences notables de densité de peuplement (in

TABLEAU 3

Production en 1975 des cultures irriguées de maïs, de sorgho et de soja. Exportation et restitution au sol

Production of irrigated cultures of maize, sorghum and soybean in 1973. Export and ground restitution

	Monoculture irriguée de sorgho		Rotation maïs-blé	
	Sorgho INRA 450	Soja Amsoy 71	Maïs INRA 400	Soja Amsoy 71
Matière sèche totale parties aériennes (en q/ha)	80,1 ± 1,7 *	79,0 ± 2,0 *	165,5 ± 3,1 *	88,9 ± 3,5 *
Grain à 0 p. 100 d'eau (en q/ha)	45,9 ± 2,4 *	30,5 ± 0,2 *	83,8 ± 0,5 *	34,4 ± 0,7 *
Résidus de récolte restitués au sol (en q/ha)	34,2	48,5	81,7	54,5
Résidus de récolte restitués au sol (C/N)	77	39	65	39
N dans parties aériennes (en kg/ha)	98	244	195	278
N restitué au sol (en kg/ha)	23	62	65	70
Reliquat N fumure + N restitué au sol (kg/ha)	75	—	70	—

* Ecart-type de la moyenne.

« Le Soja », 1978, travaux de la Station d'agronomie de Toulouse). Cette diminution de rendement après sorgho est plutôt liée à l'ensemble des conditions plus défavorables créées par la monoculture irriguée de sorgho (Marty *et al.*, 1977).

3) *Résidus de récolte laissés par les trois cultures* (tabl. 3).

En condition irriguée, les parties aériennes qui reviennent au sol après la récolte sont nettement différentes pour ces trois cultures.

Compte tenu des teneurs respectives en matière azotée de ces résidus, maïs et soja irrigués restituent au sol des quantités d'azote sous forme organique sensiblement identiques, alors que dans nos conditions expérimentales le sorgho restituait au sol des quantités beaucoup plus faibles.

Par ailleurs, les différences de rapport C/N des résidus de récolte (tabl. 3) permettent d'escompter une décomposition plus rapide des résidus du soja avec libération précoce de l'azote nitrique, et une décomposition beaucoup plus lente des tiges et feuilles de sorgho avec risque de blocage temporaire d'une certaine quantité d'azote minéral du sol. A signaler qu'aucun apport d'azote minéral n'accompagne les restitutions des résidus de récolte.

B. — *Arrière-effets du soja*

1) *Arrière-effets sur la structure du sol.*

a) *Conditions d'implantation du blé.*

Le déficit hydrique du sol au moment des récoltes de sorgho, maïs et soja déter-

miné par mesures neutroniques (Maertens *et al.*, 1972) était compris entre 100 et 120 mm. Après les récoltes, une période pluvieuse (cf. tabl. 1) a rapidement comblé ces déficits.

Après soja, l'horizon de surface saturé d'eau, a subi une nette diminution de la portance avec une tendance à la liquidité : la stabilité à l'eau de cette structure est mauvaise. Par contre, les précédents maïs et surtout sorgho maintenaient une structure de surface motteuse de meilleure cohésion.

En régime de pluviosité identique, les difficultés d'interventions rencontrées après soja ont provoqué un retard de semis du blé et celui-ci a été reporté au 26/11 sur tous les traitements.

b) *Etat du sol en fin de culture du blé.*

Des profils culturaux ont été observés en juin 1976. On n'a pas remarqué de différence nette entre les rotations et le précédent. A cause de la forte dessiccation du sol à cette époque, nous n'avons pu déterminer que la densité des mottes (Maertens, 1965) et les résultats diffèrent peu (1,88-1,89 après sorgho et maïs ; 1,92-1,93 après soja).

L'effet du précédent soja sur le sol, très net en fin de culture de soja (octobre 1975), était sous blé, en juin 1976, très discret.

2) *Arrière-effets comparés des différents précédents sur la croissance, la nutrition azotée et la production du blé.*

a) *Levée et tallage du blé.*

Le blé fut semé à trois cent cinq grains/m² sur tous les précédents. Les contrôles à la levée (tabl. 4) montrent qu'après soja, quelle que soit la rotation, les densités de

TABLEAU 4

Densité de peuplement du blé et indice de tallage selon les différentes rotations
Wheat density of plants and tiller index in different cultural rotations

Rotation	Monoculture irriguée de sorgho		Rotation maïs-blé		F calculé	F théorique aP = 0,01	ppds
Précédent	Sorgho	Soja	Maïs	Soja			
Nombre moyen de pieds/m²	184	152	201	173	6,41	5,29	11,3
Indice de tallage herbacé	3,1	4,1	3,2	3,9	6,21	5,29	0,4

levée sont plus faibles. Le précédent sorgho est inférieur au maïs. Ces résultats témoignent bien des différences de qualité du lit de semence selon le précédent. La récolte tardive et la forte pluviosité ont pénalisé la levée du blé sur le précédent soja.

Les contrôles de tallage herbacé en l'absence de fumure azotée minérale montrent que l'indice de tallage (nombre de talles par pied) est le meilleur après soja quelle que soit la rotation (tabl. 4). Par contre, le blé inséré en monoculture irriguée de sorgho possède un indice de tallage faible.

TABLEAU 5

Croissance du blé : analyse de variance
Wheat growth : variance analysis

Facteurs étudiés	Matière sèche des parties aériennes du blé		Azote total (sauf nitrates) des parties aériennes		Azote nitrique des parties aériennes	
	F calculé	Signification	F calculé	Signification	F calculé	Signification
Précédents						
S Sorgho — SS soja/sorgho — M Maïs — SM Soja/Maïs	15,52	**	52,25	**	6,15	**
Fumures						
O N — 40 — 80 — 120 — 160 N	382,89	**	44,63	**	13,54	**
Dates prélèvements						
31/3 — 27/4 — 21/5 — 22/6 — 8/7	35,31	**	1 374,76	**	47,22	**
Interactions						
Précédents × Fumures	5,39	**	4,46	**	3,17	**
Précédents × dates (croissance)	25,5	*	7,83	**	1,05	NS
Fumures × dates (croissance)	6,52	**	6,45	**	3,00	*

* 5 p. 100. ** 1 p. 100. Seuil de signification.

b) *Contrôles de croissance du blé. Courbes de réponse à différentes doses de fumure azotée minérale.*

Nous avons contrôlé, au cours de la croissance du blé d'hiver, et sur les divers traitements, la production de matière sèche et les teneurs en azote total et nitrique des parties aériennes. La signification de ces résultats est donnée par l'analyse de variance (trois facteurs : précédent, niveau de fumure azotée, prélèvement dans le temps) (tabl. 5).

Ces différentes données sont présentées sur les figures 1, 2 et 3.

Sur la figure 1, on constate que :

— la quantité de matière sèche élaborée par le blé est toujours plus élevée après le précédent maïs irrigué qu'après le précédent sorgho irrigué, quel que soit le niveau de fumure azotée,

— le précédent soja permet au blé de produire des quantités de matière sèche sensiblement identiques, quelle que soit la rotation dans laquelle la culture du soja

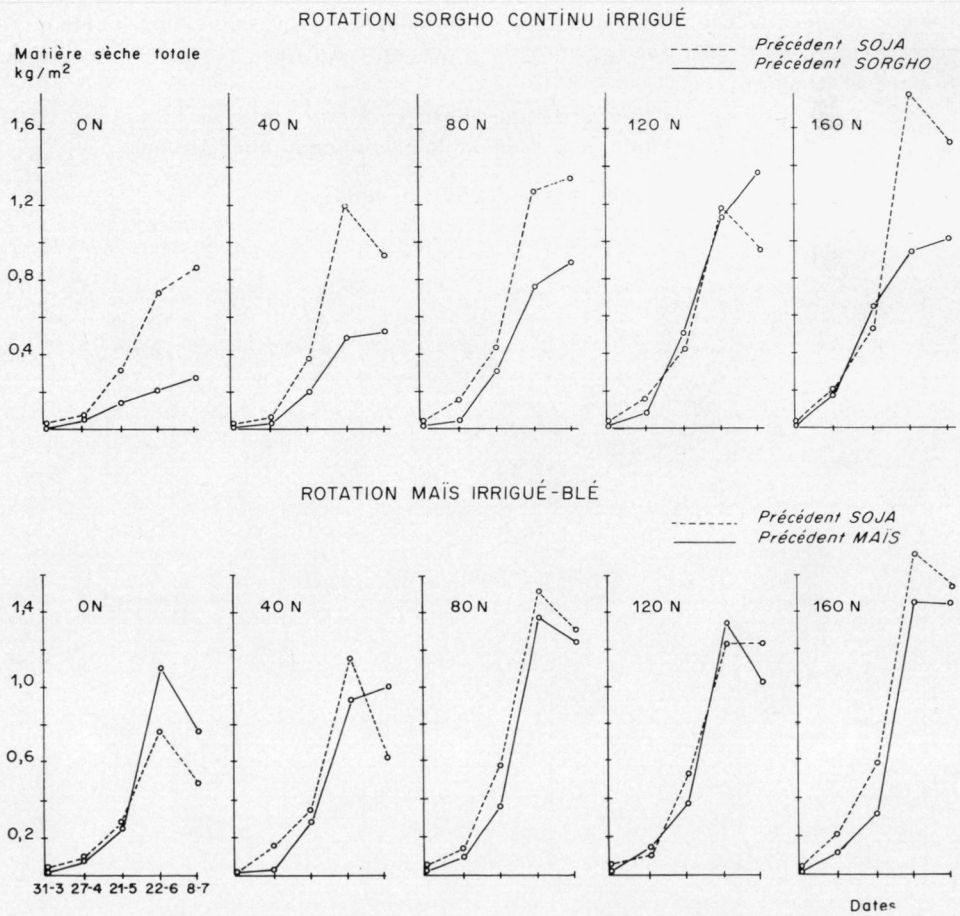


FIG. 1. — *Evolution de la production de matière sèche totale du blé d'hiver.*
Evolution of the weight of winter wheat dry matter.

a été insérée, et cela à niveau de fumure azotée comparable. Il s'ensuit que l'effet favorable du précédent soja est plus net après sorgho qu'après maïs,

— l'effet du précédent soja tend à s'accroître avec le temps, ceci pouvant être attribué au meilleur tallage constaté après soja, donc à la croissance d'un plus grand nombre de tiges,

— en l'absence d'apport d'azote (0 N), le précédent soja se révèle supérieur au précédent sorgho et inférieur au précédent maïs,

— avec des apports modérés d'azote (40 N-80 N), la quantité de matière sèche produite par le blé est supérieure après le précédent soja dans les deux rotations. C'est ensuite avec la dose d'azote la plus forte (160 N) que l'on retrouve cet effet positif du précédent soja.

Remarquons enfin que la matière sèche totale tend à être à son maximum 15 jours environ avant la récolte (Page *et al.*, 1977).

c) *Evolution des teneurs en azote total et en azote nitrique de la matière sèche du blé.*

Sur la figure 2, on constate que les teneurs en azote total de la matière sèche du blé augmentent avec le niveau de fumure et diminuent au cours du temps. Ces teneurs sont régulièrement plus élevées après le précédent soja quel que soit le niveau de fumure et jusqu'au 21/5.

On peut observer sur la figure 3 que les teneurs en nitrates de la matière sèche du blé varient selon la rotation, le précédent, le niveau de fumure azotée.

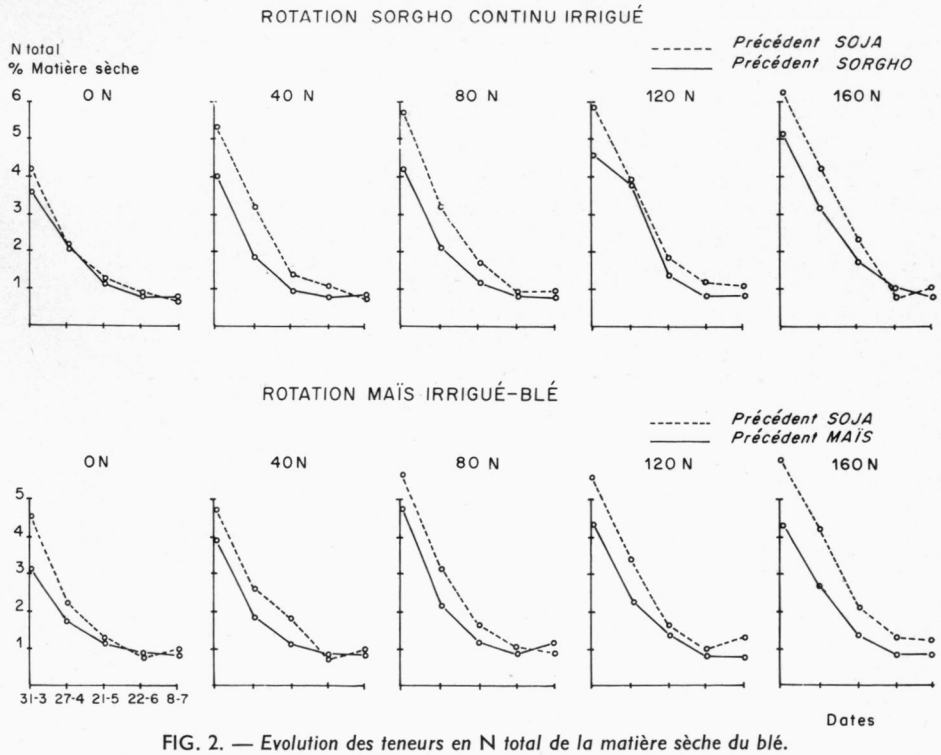


FIG. 2. — *Evolution des teneurs en N total de la matière sèche du blé.*
Evolution of N total contents in wheat dry matter.

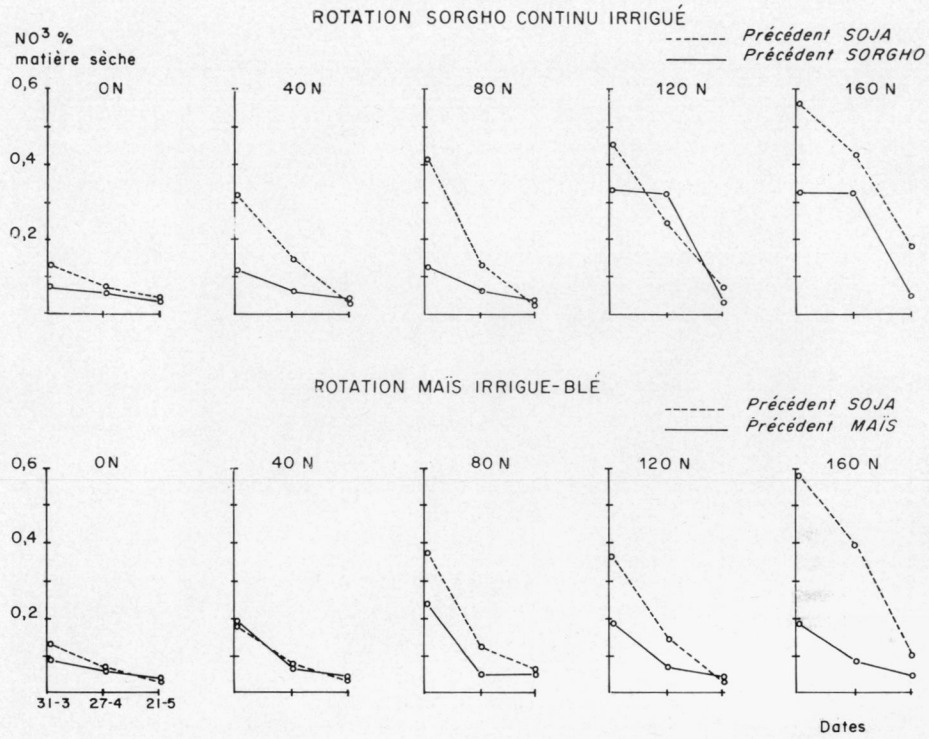


FIG. 3. — *Evolution de la teneur en nitrates de la matière sèche du blé.*
Evolution of nitrate contents in wheat dry matter.

Les teneurs en nitrates dans le blé varient à chaque niveau de fumure selon que le précédent est maïs ou sorgho : elles sont plus faibles après sorgho pour les niveaux faibles de fumure azotée (0,40 N, 80 N) et plus fortes pour les niveaux élevés (120 N, 160 N) qu'après le précédent maïs. Dans chacune des rotations, et quel que soit le niveau de fumure azotée, l'insertion du soja accroît le pourcentage de N-NO^3 dans le blé.

Pour une même année climatique et un même sol, ceci témoigne d'une disponibilité en azote du sol variable selon le précédent et le niveau de fumure et qui ne peut être attribué ni aux reliquats d'azote sensiblement identiques dans les deux rotations (cf. tabl. 3), ni au drainage nul au cours de ces périodes (cf. tabl. 1). Par ailleurs, on a pu contrôler que le soja augmente la disponibilité en nitrates du sol dès la récolte et ce phénomène se poursuit pendant la période hivernale (Juste, communications personnelles, données non publiées). Cet effet précoce et favorable du précédent soja sur l'alimentation azotée du blé peut être attribué à la décomposition rapide des nodosités, à l'importance des résidus de récolte (4,9 t à 5,5 t/ha, cf. tabl. 3) et au rapport C/N relativement faible de ces résidus.

d) *Evolution des quantités d'azote absorbées par le blé en cours de végétation selon les précédents.*

Dans la figure 4 sont comparées les quantités d'azote absorbées par le blé d'hiver

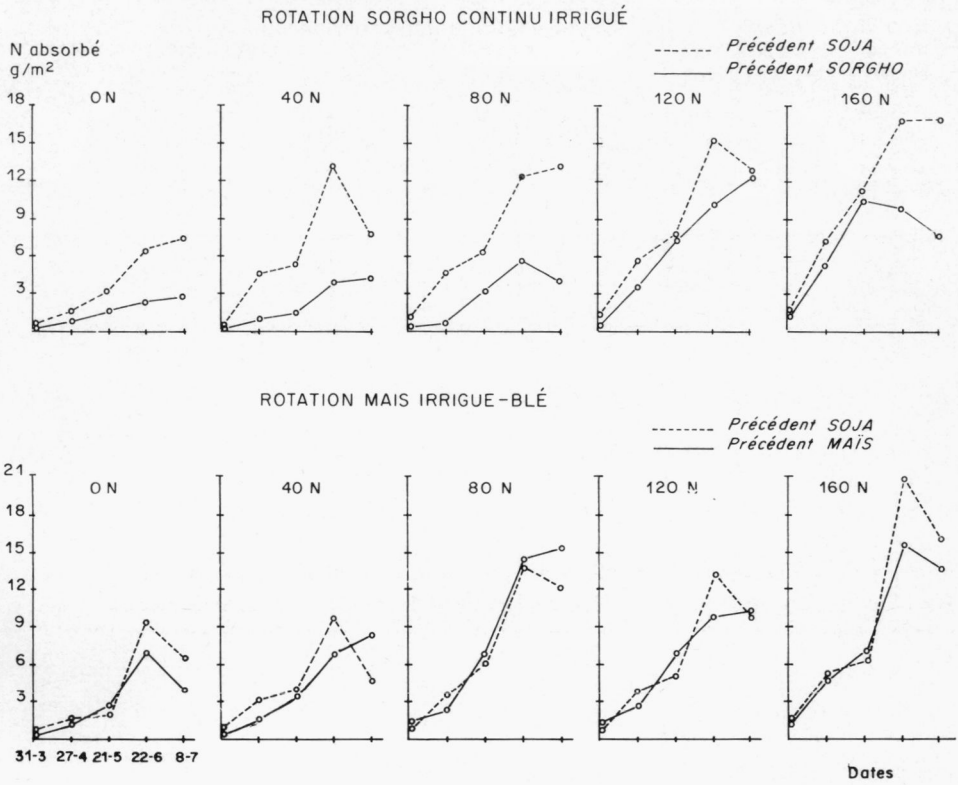


FIG. 4. — *Azote total absorbé par le blé selon le précédent et la rotation.*
Uptake of total nitrogen by wheat according to precedent and cultural rotation.

selon les différents précédents dans les deux rotations. Ces résultats peuvent traduire la disponibilité en nitrates pour le blé d'hiver pour les différents précédents dans les conditions climatiques de 1975-76, malgré les pertes possibles d'azote par les racines et les parties aériennes à partir de la floraison, signalées par divers auteurs (Daigger *et al.*, 1976).

On peut remarquer que :

— le blé après sorgho continu irrigué a absorbé environ deux fois moins d'azote qu'après maïs, sauf pour le traitement 120 N,

— le précédent soja permet au blé d'absorber des quantités d'azote sensiblement identiques dans les deux rotations. L'arrière-effet sur blé d'une culture de soja est donc bénéfique dans le cas où celle-ci est insérée en monoculture irriguée de sorgho, précédent peu favorable au blé. Par contre, selon ce critère, l'effet soja est pratiquement nul dans la rotation maïs-blé,

— le niveau de nutrition azotée du blé augmente avec les doses d'azote apportées, quel que soit le précédent,

— on peut enfin noter entre le 22/6 et le 8/7 une tendance à une diminution des quantités d'azote contenues dans les parties aériennes, en relation avec la production de matière sèche (cf. graphique 1).

e) *Production du blé selon les différents précédents.*

La signification des résultats est donnée au tableau 6 (analyse de variance, deux facteurs : précédent, fumure).

TABLEAU 6

Récolte : analyse de variance
Harvesting : variance analysis

Facteurs étudiés					Grain		Matière sèche totale (grain + paille)	
					F calculé	Signification	F calculé	Signification
Précédents								
S Sorgho	SS Soja/Sorgho		M Maïs	SM Soja/Maïs ..	11,75	**	27,55	**
Fumures								
O N	40	80	120	160	39,58	**	59,17	**

Sur la figure 5 sont comparées les courbes de production de matière sèche totale (paille + grain) et de grain des différents précédents selon le niveau de fumure azotée, ainsi que les quantités d'azote contenues dans la paille et le grain à la récolte.

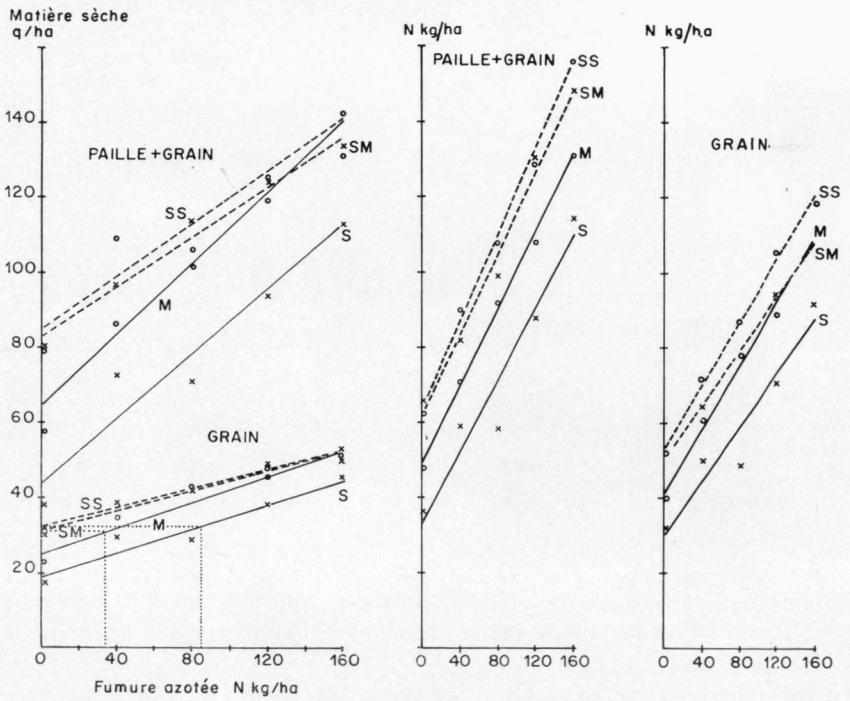


FIG. 5. — *Production et azote des parties aériennes du blé selon les divers précédents* : Rotation Sorgho continu = S précédent sorgho ; SS précédent soja. Rotation maïs blé = M précédent maïs ; SM précédent soja.

Production and nitrogen amount of above ground wheat according to different precedings.

Les données expérimentales ont été ajustées au modèle suivant (coefficient de corrélation de Pearson):

$y = b + ax$ avec y = q/ha de matière sèche (paille + grain) ou q/ha de grain et x = dose fumure N en kg/ha.

Ces données sont présentées au tableau 7.

TABLEAU 7

I. — *Courbes de réponse à la fumure azotée d'après la production de matière sèche des parties aériennes*
Curves of response to the nitrogen fertiliser according to the above ground dry weight

		Terme constant (b)		Coeff. régression (a)		Coeff. corrélation	
	Précédent	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*
Rotation monoculture sorgho irrigué	Paille + Grain....	43,3	84,4	0,43	0,35	0,93	0,92
	Grain.....	19,1	32,2	0,16	0,13	0,94	0,97
	Précédent	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*
Rotation maïs-blé	Paille + Grain....	62,2	83,0	0,48	0,33	0,97	0,98
	Grain.....	25,7	31,4	0,17	0,13	0,96	0,98

II. — *Courbes de réponse à la fumure azotée d'après la quantité de N contenue dans les parties aériennes du blé*
Curves of response to the nitrogen fertiliser according to the N content in above ground wheat

		Terme constant (b)		Coeff. régression (a)		Coeff. corrélation	
	Précédent	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*
Rotation monoculture sorgho irrigué	Paille + Grain....	33,8	64,4	0,47	0,57	0,93	0,99
	Grain.....	30,4	53,2	0,36	0,42	0,93	0,99
	Précédent	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*
Rotation maïs-blé	Paille + Grain....	49,8	62,8	0,51	0,53	0,99	0,99
	Grain.....	42,4	50,6	0,42	0,36	0,99	0,99

Les courbes de réponse à la fumure azotée se différencient nettement selon les précédents pour la production de matière sèche et les quantités d'azote contenues dans les parties aériennes.

Le précédent soja se classe au-dessus des précédents maïs ou sorgho pour chacune des rotations. Le précédent maïs est supérieur au précédent sorgho.

La production de grain du blé d'hiver augmente beaucoup moins avec le niveau de fumure azotée que la production de matière sèche totale. L'augmentation de la

production et des quantités d'azote absorbées est linéaire jusqu'à la plus forte dose d'azote appliquée (160 N). Dans cette gamme de fumure azotée, le kg d'azote apporté par la fumure fournit 16 à 17 kg de blé après sorgho ou maïs et 12 à 13 kg après soja. Decau *et al.* (1977) montrent que cette augmentation linéaire se poursuit au-delà de 160 kg/ha d'azote dans nos conditions pédoclimatiques.

Les pentes des droites de réponse à la fumure azotée correspondant au précédent soja sont plus faibles que celles des autres précédents : l'effet soja est plus important aux faibles doses d'azote. Ces résultats rejoignent ceux des travaux antérieurs qui ont montré que la productivité de l'azote minéral apporté par la fumure varie en sens inverse de la fertilité du sol à l'origine (Soubiès *et al.*, 1961). Par contre, si les précédents maïs et sorgho ont des droites de réponse sensiblement parallèles, l'ordonnée à l'origine est inférieure après sorgho, ce qui témoigne d'une chute sensible de la fertilité après la monoculture.

Compte tenu des difficultés déjà signalées (Daigger *et al.*, 1976), il apparaît que l'efficience de la fumure azotée sur le blé d'hiver exprimée par le rapport :

$$\frac{\text{N exporté grain}}{\text{N apporté fumure}}$$

est nettement améliorée par l'insertion du soja en monoculture irriguée de sorgho ; par contre, introduit en rotation maïs-blé, le soja n'augmente pas ou peu ce rapport. L'efficience de la fumure diminue par ailleurs avec l'importance des apports. Elle est égale à 1 (exportation grain = N fumure) pour 73 kg de N apporté par la fumure dans la rotation maïs-blé pour le précédent maïs et de 79 kg de N pour le précédent soja. En monoculture irriguée de sorgho,cette efficience égale l'unité pour 48 kg de N de la fumure en précédent sorgho et pour 92 kg de N en précédent soja. Pour le plus haut niveau de fumure azotée de l'essai, elle atteint au maximum 0,75 (précédent soja de la rotation sorgho irrigué continu) et au minimum 0,55 (précédent sorgho). Cette efficience relativement faible de la fumure azotée sur blé d'hiver en conditions du Sud-Ouest de la France a déjà été signalée par ailleurs (Marty *et al.*, 1977) ainsi que son amélioration par l'introduction d'une légumineuse dans la rotation.

L'effet bénéfique du précédent soja sur le grain est important lorsque cette légumineuse est introduite en monoculture irriguée de sorgho, système dégradant en sols limono argileux (Marty *et al.*, 1977) ; il est beaucoup moins net en rotation maïs irrigué-blé sauf pour les faibles niveaux de fumure azotée.

On peut calculer à partir des données du tableau 7 que l'équivalent fumure azotée du précédent soja par rapport à la fumure N = 0 du précédent maïs ou sorgho varie suivant que l'on considère la production, grain ou grain + paille, ou les quantités d'azote absorbées par les parties aériennes.

Ainsi :

— en monoculture irriguée de sorgho, l'équivalent fumure azotée à l'hectare du précédent soja est respectivement de 96 et 82 kg de N pour la production de paille + grain et de grain, et de 65 et 63 kg de N pour l'azote contenu dans la paille + grain et le grain,

— rotation maïs irrigué-blé, l'équivalent fumure azotée du précédent soja correspond à 39 et 34 kg de N par rapport à la production paille + grain et grain, et de 25 et 20 kg de N pour l'azote contenu dans la paille + grain et le grain.

TABLEAU 8

Le rendement du blé d'hiver et ses composantes
Winter wheat yields and its components

1) *Monoculture irriguée de sorgho*

Fumure N kg/ha	0		40		80		120		160	
Précédent	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*	*Sorgho*	*Soja*
Nombre de pieds au m^2	174	136	168	151	192	178	188	161	200	137
Nombre d'épis par pied	0,98	2,26	1,25	2,31	1,68	2,48	2,14	2,46	2,12	3,56
Nombre de grains par m^2	4 900	8 570	8 120	11 400	7 870	11 750	10 520	13 750	12 930	15 350
Nombre de grains * par épis	28,7	27,9	38,7	32,7	24,4	26,6	26,1	34,7	30,5	31,5
Poids de mille grains	35,6	35,7	36,7	34,4	37,5	36,5	36,1	35,5	35,8	34,2
Rendement grain à 0 p. 100 H_2O q/ha	17,5	30,6	29,8	39,3	29,5	42,9	38,0	48,9	46,3	52,5

2) *Rotation maïs irrigué-blé*

Fumure N kg/ha	0		40		80		120		160	
Précédent	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*	*Maïs*	*Soja*
Nombre de pieds au m^2	198	163	193	162	212	181	193	186	208	176
Nombre d'épis par pied	1,45	1,76	1,36	2,12	2,30	2,12	2,45	2,04	1,93	2,56
Nombre de grains par m^2	6 200	8 890	9 300	10 740	11 230	12 700	13 000	15 800	14 100	15 120
Nombre de grains * par épis	21,6	31,0	35,4	31,3	23,0	33,1	27,5	41,6	35,1	33,6
Poids de mille grains	37,1	35,0	37,2	33,7	37,3	33,0	35,2	30,9	36,7	33,6
Rendement grain à 0 p. 100 H_2O q/ha	23,0	31,1	34,6	36,3	41,9	41,9	45,9	48,8	51,8	50,8

* Obtenu par calcul.

Si l'on ne tient compte que de l'azote contenu dans le grain (risques de mauvaise finition de celui-ci), on peut donc attribuer un équivalent fumure azotée au précédent soja de 60-65 kg lorsqu'il est inséré en monoculture de sorgho irrigué et de 20 kg lorsqu'il est introduit en rotation maïs irrigé-blé.

Dans les mêmes conditions, il ressort que l'équivalent fumure N du précédent maïs irrigué par rapport au précédent sorgho irrigué, sur blé d'hiver, est égal à 41 kg de N.

Ces résultats confirment et précisent les premières données obtenues (Perigois, 1974) et montrent bien que l'effet du précédent soja dépend de la rotation pratiquée.

f) *Composantes du rendement du blé d'hiver.*

On remarque pour tous les traitements (tabl. 8) :

— un nombre de pieds au m² inférieur à l'optimum escompté de 250 pieds/m² (semis tardif, difficultés d'implantations),

— un nombre d'épis nettement inférieur au tallage herbacé (cf. tabl. 4) et à l'optimum souhaité de 550 épis/m², notamment pour les faibles doses d'azote et en dehors du précédent soja,

— un poids de mille grains inférieur à la normale pour la variété considérée.

L'effet précédent a joué :

— sur le nombre de pieds au m²,

— sur le nombre d'épis par pied : le précédent soja l'augmente notamment après monoculture irriguée de sorgho. Il en résulte, en général, un plus grand nombre d'épis au m² après soja,

— sur le poids de mille grains, toujours inférieur après soja.

Le nombre de grains calculé par épis présente une variabilité liée à la fois à la densité d'épis au m², au précédent, à la dose d'azote apportée et aux phénomènes de compensation entre ces éléments. Par contre, le nombre de grains au m² qui traduit bien l'influence du milieu sur l'élaboration du rendement (Boiffin *et al.*, 1976) montre l'influence de chacun des précédents et de la rotation dans lequel ils étaient inclus sur le fonctionnement du peuplement du blé. Le soja a permis de corriger l'effet rotation en produisant un nombre de grains par m² sensiblement égal à niveau comparable de fumure azotée, quelle que soit la rotation.

L'effet azote s'est conjugué à l'effet précédent du soja avec, pour chaque niveau de fumure N, une augmentation du nombre de grains/m², et l'interaction azote-déficit hydrique a contrebalancé l'effet favorable de la nutrition azotée par une diminution du poids de mille grains probablement liée aux possibilités de transfert liquide dans la plante (Mingeau *et al.*, 1972).

III. — Discussions et conclusions

Le soja s'est bien comporté dans les deux rotations céréalières, son rendement fut cependant inférieur de 3,9 q/ha après monoculture irriguée de sorgho. Les arrière-effets se retouvent à la fois sur le sol (effet physique) et sur le fonctionnement du peuplement d'un blé d'hiver (effet azote).

Ces arrière-effets peuvent être plus ou moins favorables (Ronsin, 1977), ils dépendent de plusieurs conditions :

— de la réussite de la culture de soja et de l'importance des parties aériennes et racinaires (les arrière-effets du soja varieront avec le rendement fourni par la culture),

— de la possibilité de semer rapidement une céréale d'hiver après le soja afin de bénéficier des effets immédiats sur le sol et des arrière-effets azote en cours d'hiver,

— de la rotation pratiquée et de l'état de la parcelle,

— de la réussite de l'implantation du blé,

— des conditions pédo-climatiques.

Les effets physiques, en particulier les modifications structurales, ne sont pas faciles à mettre en évidence et cela d'autant plus que la structure est plus dégradée après monoculture irriguée de sorgho que dans la rotation maïs-blé. Mais les conséquences sur l'implantation du blé d'hiver sont importantes : si celui-ci est semé en terre trop humide, le précédent soja s'avère le moins bon, avec moins de plantes levées par m^2, d'où un handicap au départ. A cet égard, la variété Amsoy 71 est trop tardive pour assurer une reprise des terres en bonnes conditions.

Par contre, l'effet azote du précédent soja est très net : tallage, nombre de grains au m^2, quantités d'azote absorbées sont plus élevés après soja malgré un nombre moindre de plantes au m^2 au départ. Cet effet se retrouve aux différentes doses d'azote minéral appliquées.

Malgré le rattrapage dû aux effets de l'azote, les rendements sont relativement faibles même dans les meilleures conditions de précédent et de fumure par suite d'échaudage ou d'attaque cryptogamique d'autant plus grave que le niveau de fumure azotée était élevé, notamment après le précédent soja. Ces conditions concourent à gêner les transferts vers le grain au cours de la maturité.

Ces aspects conjugués d'échaudage et de maladies sont fréquents dans les conditions pédo-climatiques du Sud-Ouest de la France et sont en grande part responsables des faibles rendements moyens enregistrés dans cette région. Il faut souligner que la pluviosité n'a pas été excédentaire en janvier, février et mars 1976, ce qui aurait encore pu avoir un effet dépressif sur les rendements (Soubiès *et al.*, 1960).

L'effet azote sur la croissance, le développement et la nutrition azotée d'une culture de blé d'hiver est donc très net, qu'il provienne du précédent ou de la fumure. Cependant cet effet ne s'est pas traduit nettement sur la production de grain car le déficit hydrique débuta à la floraison et s'accentua fortement pendant la formation du grain.

Ainsi, pour une année climatique à très faible drainage d'hiver et de printemps, l'équivalent fumure azotée du précédent soja sur une culture de blé varie selon la rotation dans laquelle cette légumineuse est introduite. Il peut être faible (20 kg N/ha), cas de la rotation maïs irrigué-blé, il peut atteindre 65 kg d'azote à l'ha, cas de la monoculture irriguée de sorgho. Pour une année à drainage hivernal important, des contrôles antérieurs (Perigois 1974), ont montré que l'équivalent azote du précédent soja se situait aux environs de 40 à 50 kg/ha d'azote en rotation sorgho-blé. Cet effet azote peut masquer un déficit global au niveau de la matière organique du sol, la symbiose ne permettant pas de fournir toujours en totalité les quantités d'azote exportées par le grain dans le cas de rendements élevés en soja (Decau *et al.*, 1976).

Il ne nous a pas été possible de chiffrer la part respective de chacune des étapes,

du semis à la récolte, sur la formation de rendement par suite des processus de « compensation » et des interactions multiples, état du sol, enracinement de la culture, eau et azote, état sanitaire et azote, etc...

Nous nous proposons, dans un prochain mémoire, de compléter l'étude des différents précédents et rotations sur la croissance et la production d'un blé d'hiver et de préciser l'effet azote que l'on peut attendre des légumineuses.

Reçu pour publication en mai 1979.

Remerciements

Nous remercions vivement MM. A. Ph. Conésa et A. Marin-Laflèche (respectivement, Stations d'agronomie I. N. R. A. de Colmar et de Laon) pour leurs critiques constructives du manuscrit.

Summary

First observations on the effects obtained by introducing soya bean in cereal crop rotations

A soya bean culture was introduced in two cereal crop rotations : a six year long irrigated sorghum monoculture and an irrigated maize-wheat succession. We tested the soya bean production and its after-effects as compared with the two other precedents : maize and sorghum, of each of the rotations.

Soya bean showed satisfying behaviour in both crop rotations although its yield has been 3,9 q/ha lower after the irrigated sorghum monoculture.

The after-effects of soya bean can be observed both on the soil (physical effect) and on the behaviour of a winter wheat introduced after the soya bean in the two crop rotations (nitrogen effect) :

The effects on the soil are transitory and difficult to reveal. The culture profiles show modifications of the structure especially of the more degraded one obtained after an irrigated sorghum monoculture. There is a favourable effect of the precedent « soya bean » on the winter wheat sowing only when the latter can be carried out in a still dry soil.

The nitrogen effect of the precedent « soya bean » on the winter wheat is very clear. It can be observed during growth and development of wheat : tillering, seed number per sqm, thousand seed weight, production of straw and seeds as well as in the amount of nitrogen absorbed by the culture. The curves representing the response to the nitrogen supply according to the dry matter production and the amount of nitrogen contained in the aerial parts allow to classify the different precedents and show the favourable effect of the precedent « soya bean » even if because of shrivelling or other diseases the seed production is not much higher.

The nitrogen equivalent of the precedent « soya bean » on winter wheat varies according to the crop rotation from some kg nitrogen/ha for an irrigated maize wheat rotation to 70 kg/ha for an irrigated sorghum monoculture.

Zusammenfassung

Erste Beobachtungen der Effekten der Einfuhrung von Sojabohne in Getreidenfruchtfolgen

Ein Sojabohnenanbau wurde in zwei Getreidenfruchtfolgen eingeführt : eine sechsjährige bewässerte Sorghummonokultur und eine Reihenfolge von bewässertem Mais und Korn. Die Sojabohneerzeugung und ihre Nachwirkungen wurden im Vergleich mit den zwei vorhergehenden Kulturen, Mais und Sorghum, jeder Fruchtfolge kontrolliert.

Sojabohne hat sich in diesen zwei Fruchtfolgen befriedigend verhalten, obwohl ihr Ertrag nach einer bewässerten Sorghummonokultur 3,9 q/ha niedriger gewesen ist.

Die Nachwirkungen der Sojabohne finden sich zugleich auf dem Boden (physikalischer Effekt) und beim Verhalten eines Winterkorns wieder, das nach der Sojabohne in den zwei Fruchtfolgen (Stickstoffeffekt) eingeführt worden ist :

Die Wirkungen auf den Boden sind vorübergehend und schwierig darzustellen. Die Kulturprofile aüssern Anderungen in der Struktur, insbesondere in dieser mehr degradierten, nach bewässerter Sorghummonokultur erzielten Struktur. Ein günstiger Effekt der vorhergehenden Kultur « Sojabohne » auf die Aussaat « Winterkorn » wird nur erreicht, wenn die letztere auf noch trockenem Boden durchgeführt werden sein kann.

Der Stickstoffeffekt der vorhergehenden Kultur « Sojabohne » auf das Winterkorn ist sehr deutlich. Es kann beim Wachstum und der Entwicklung von Korn : Bestocken, Kornzahl/m^2, Tausendkorngewicht, Stroh- und Kornertrag, sowie bei den durch die Kultur aufgenommenen Stickstoffmengen beobachtet werden. Die Kurven der Reaktion auf die Stickstoffdüngung je nach der Trockensubstanzerzeugung und der in den oberirdischen Teilen enthaltenen Stickstoffmenge ermöglichenes, die verschiedenen vorhergehenden Kulturen zu klassifizieren und zeigen den günstigen Effekt von Sojabohne als vorhergehende Kultur, auch wenn infolge von Braunfleckigheit oderK rankheiten deutlich höhere Kornerträge nicht erreicht werden.

Das Stickstoffäquivalent der Sojabohne als vorhergehende Kultur auf das Winterkorn variiertjenach der Fruchtfolge von einigen Kilos Stickstoff/ha in einer Fruchtfolge von bewässertem Mais und Korn zu 70 kg/ha in einer bewässerten Sorghummonokultur.

РЕЗЮМЕ

Первые наблюдения над эффектом введения сои в злаковые севообороты.

МАРТИ Ж. Р., ХИЛЕР А.

Культура сои вводилась в два злаковых севооборота : орошаемую монокультуру сорго в течении 6-ти лет и чередование орошаемой культуры кукурузы и пшеницы. Проверяясь продуктивность сои и ее последействие, по сравнению с двумя другими предшественниками (кукуруза и сорго) каждого из севооборотов.

В этих условиях соя дала очень хорошие результаты, несмотря на то что урожай ее был на 3,9 цен. /га меньше после орошаемой культуры сорго.

Последействие сои сказалось как на почве (физический эффект), так и на озимой пшенице, посеянной после сои в обоих севооборотах (эффект азота).

Действие сои на почву — мимолетно, и выявить его очень трудно. Структуры профилей под культурами изменяются, в особенности структура более сильно деградированная орошаемой культурой сорго. Соя в качестве предшественника оказывает благоприятное действие на посевы озимой пшеницы только в случаях, когда посевы эти производятся на почве еще сухой.

Азотный эффект сои, культивируемой перед озимой пшеницей — очень четок и его можно наблюдать на росте и развитии пшеницы : кущении, количестве зерна на $м^2$, весе 1 000 зерен, продукции соломы и зерна и количестве азота поглощенного куальтурой. Кривые реакций на азотное удобрение : продукции сухого вещества и количеств азота содержащихся в воздушных частях растений, позволяют классифицировать предшествующие культуры и подтверждают благоприятное действие сои на последующую культуру, даже тогда, когда в случае захвата зерновых, или болезней, продукция зерна не достигает очень крупных величин.

Количества азота, предоставляемые соей в пользование последующей культуры озимой пшеницы, изменяются в зависимости от севооборота. Они эквивалентны нескольким килограммам азота / га в случае севооборота орошаемая кукуруза — пшеница, и 70 кг азота / га при орошаемой монокультуре сорго.

Références bibliographiques

BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., COUVREUR Fr., 1976. Incidence de la simplification du travail du sol sur l'élaboration des rendements du blé et du maïs, 239-280. In : *Simplification du travail du sol en production céréalière.* Brochure I. T. C. F. 305 p.

DAIGGER L. A., SANDER D. H., PETERSON G. A., 1976. Nitrogen content of winter wheat during growth and maturation. *Agron. J.*, **68,** 815-818.

DECAU J., BOUNIOLS A., LENCREROT P., PUECH J., 1975. Concurrence ou complémentarité de l'alimentation azotée non symbiotique et de la fixation bactérienne chez le Soja (Glycine max. L. Merr.). *C. R. Acad. Sci.*, **281,** 535-538.

DECAU J., BOUNIOLS A., MONDIES M., PACE A., PUJOL B., 1976. Contribution à l'étude de la nutrition azotée du Soja (Glycine max. L. Merr.) : recherche d'une estimation des activités respectives de la fixation bactérienne et de l'absorption non symbiotique fondée sur le dosage des nitrates présents dans le végétal. *C. R. Acad. Sci.*, **283,** 773-776.

DECAU J., COMBRET M., PUJOL B., 1977. Effet de fertilisations azotées de différents niveaux en rotation céréalière dans le Sud-Ouest de la France. Production de grains et de protéines. *Ann. agron.*, **28** (3), 313-328.

LANGLET A., 1973. Effets de la sécheresse sur la croissance et a production de sorgho grain. *Ann. agron.*, **24** (3), 307-338.

MAERTENS C., 1965. Deux méthodes de détermination de la densité du sol en place, leurs possibilités d'utilisation. *Bull. Assoc. fr. Etud. Sol.*, 283-290.

MAERTENS C., MARTY J-R., 1972. Contrôle de l'utilisation et de l'efficience de l'eau chez diverses cultures irriguées ou non, au moyen d'humidimètres à neutrons, in : *Isotopes and radiation in soil plant relationships including forestry*. Intern. Atomic Energy Agency, Vienne, 621-630.

MALTERRE H., 1956. La fumure rationnelle des céréales en Aquitaine. *Bull. techn. Inf.*, **111,** 371-381.

MARTY J-R., HILAIRE A., BOSC N., 1977. Rendement protéique de la fumure azotée chez quelques cultures et succession de cultures du Sud-Ouest de la France. *Bull. techn. Inf.*, **323,** 551-558.

MARTY J-R., PERNY R-A., HILAIRE A., 1977. Evolution de la flore adventice en culture de maïs et de sorgho appartenant à différentes rotations irriguées ou non. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 272-283.

MINGEAU M., ROBELIN M., 1972. Le transfert de l'eau dans la plante : action particulière de la nutrition azotée. *Ann. agron.*, **23** (4), 419-427.

MINGEAU M., 1974. Etude de la sensibilité du soja à la sécheresse. *Inform. techn. C. E. T. I. O. M.*, **47,** 1-14.

PAGE M. B., JEAN L. SMALLEY, TALIBUDEEN O., 1977. The growth and nutrient uptake of winter wheat. *Plant Soil*, **49,** 149-160.

PERIGOIS J. M., 1974. *Arrière-effet du soja*, Mémoire E. N. I. T. A. Dijon, 101 pages.

PUECH J., BONNAL J. M., HERNANDEZ M., 1977. Alimentation hydrique et irrigation du soja et du tournesol. *Bull. techn. Inf.*, **319-320,** 221-230.

ROBELIN M., COLLIER D., 1958. Evapotranspiration et rendements culturaux. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **247,** 1774-1776.

RONCIN F., 1976. *Insertion du soja dans les systèmes de culture. Rapport sur la pré-enquête effectuée sur l'effet précédent soja sur le blé et le maïs en* 1975. Brochure Inst. Nat. Agron. Paris-Grignon, Chaire d'Agronomie, 33 p.

RONCIN F., 1977. *Insertion du soja dans les systèmes de culture. Etude de l'effet précédent soja et de ses arrière-effets sur les cultures de céréales* 1975-76. Brochure Inst. Nat. Agron. Paris-Grignon, Chaire d'Agronomie, 52 p.

SOUBIÈS L., GADET R., MAURY P., 1960. Le climat de la région de Toulouse et son influence sur les récoltes de blé et de maïs. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 185-195.

SOUBIÈS L., GADET R., LENAIN M., 1961. La productivité de l'azote appliqué sur blé d'hiver et ses variations dans la région toulousaine. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 458-463.

Travaux réalisés de 1974 à 1977 par la Station d'Agronomie de Toulouse en collaboration avec le C. E. T. I. O. M., 1978. *Le Soja. Fonctionnement et maitrise de la culture*, Brochure I. N. R. A., 133 p.

Ann. agron., 1979, **30** (2), 213-214.

Chronique des livres

DE WIT C. T. et GOUDRIAAN J. — *Simulation of ecological processes*. Série : « Simulation Monographs », PUDOC Ed. Wageningen (Pays-Bas), 183 p., 1978.

La simple lecture du plan de cet ouvrage indique le but recherché par les auteurs : conduire le lecteur de l'analyse et de la simulation de phénomènes simples (croissance exponentielle) à des études où il y a interaction entre plusieurs facteurs (lutte biologique).

La présentation sommaire des études écologiques, les rappels mathématiques indispensables et l'intégration dans le texte d'un très grand nombre d'exercices (corrigés) rendent très agréable la lecture de ce petit livre. Les exercices de programmation sont présentés en langage CSMP ce qui permet de ne pas alourdir le texte. Une initiation progressive à ce langage conduit à une compréhension suffisante de la structure des programmes.

Plan :

— Croissance exponentielle.
— Croissance de levures.
— Compétition entre plantes.
— Croissance et compétition chez la Paramécie.
— Croissance et développement d'*Helminthosporium maydis*.
— Évolution de populations d'araignées rouges et d'acariens prédateurs.

R. B.

COSTES C. — *Photosynthèse et production végétale*. Collection « Formation permanente en écologie et biologie ». Gauthier-Villars. Ed. Paris, 371 p., 1978.

Cet ouvrage rassemble une série de conférences prononcées au cours de trois séminaires animés par C. Costes à l'Institut National Agronomique, au centre de Grignon en mars 1974, septembre 1975 et mai 1977.

Les auteurs de cet ouvrage collectif, venus de l'I. N. R. A. ou de l'Université, se sont attachés à faire le point des principales connaissances maintenant admises sur la photosynthèse des végétaux. De nombreux problèmes non encore résolus y sont mis en évidence, dans un domaine en pleine évolution.

La première partie de l'ouvrage propose une vue unitaire actuelle de l'ensemble des phénomènes photosynthétiques, parfois volontairement simplifiée et schématique : ultrastructure et répartition des chloroplastes, processus photochimiques et bilan global, phosphorilation photosynthétique, insertion progressive du gaz carbonique dans la matière organique. Elle se termine par une analyse des propriétés des stomates, sites priviligiés des échanges gazeux.

Une seconde partie tente d'étudier l'intégration des mécanismes du métabolisme et des échanges gazeux photosynthétiques, depuis la population des chloroplastes jusqu'au couvert végétal tel qu'il se présente dans les champs. Les différentes voies de fixation du gaz carbonique (plantes de type C3, C4, crassulacées) sont discutées, ainsi que les interactions de la consommation hydrique et de l'absorption photosynthétique de CO_2.

Enfin, le lecteur est conduit jusqu'au niveau agronomique de la production végétale sous ses aspects quantitatifs, avec la présentation de quelques problèmes globaux ou spécifiques d'intérêt économique : culture sous serre, production forestière, culture côtière d'algues marines, résistance sélective de quelques espèces végétales à la pollution de l'air.

M. C.

Tropical Forest Ecosystems. A state of knowledge report. UNESCO/UNEP/FAO. Série « Natural resources research » XIV, UNESCO Paris, 1978, 683 p.

Ce volumineux ouvrage (683 p.) tente de faire le point des connaissances sur la structure, le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes forestiers tropicaux et sur les populations qui vivent dans ou près de ces écosystèmes.

La première partie « description, fonctionnement et évolution des écosystèmes forestiers tropicaux » donne des informations sur la composition, la structure, la biomasse, les productivités primaire et secondaire, les bilans d'eau, d'énergie, des éléments nutritifs ainsi que sur la stabilité, les interactions, la régénération et les événements pathologiques dans ces écosystèmes.

Puis une grande partie de l'ouvrage est consacrée aux populations vivant dans ou à proximité de ces lieux. En plus des aspects démographiques et sanitaires une grande attention est portée à la compréhension des systèmes traditionnels de mise en valeur et des contraintes socio-économiques qui en résultent.

Enfin huit exemples régionaux sont présentés et analysés sous différents points de vue :

— Structure et fonctionnement de l'écosystème forêt tropicale humide en Côte d'Ivoire ;
— Ecosystème forestier au Gabon ;
— Régénération et mise en valeur de quelques écosystèmes de la haute forêt nigérienne ;
— L'écosystème miombo (Zaïre) ;
— Les écosystèmes forestiers de l'Amazonie brésilienne : description, fonctionnement et perspectives de recherches ;
— Un exemple de sylviculture et de mise en valeur des écosystèmes forestiers tropicaux en Inde ;
— Les écosystèmes forestiers de Malaisie et de Mélanésie.

A tout instant cet ouvrage tente d'identifier les points qui nécessitent d'être approfondis et les méthodologies à mettre en œuvre pour des études orientées sur les écosystèmes forestiers tropicaux.

R. B.

Normalisation et échange de données pédologiques par ordinateur, Paris, Agence de Coopération Culturelle et Technique, 1979, 192 p.

Des banques de données de sols sont actuellement créées ou exploitées dans de nombreux pays. Un effort original d'harmonisation et de coopération vient d'être tenté par les spécialistes francophones, sous l'impulsion de l'Agence de Coopération Culturelle et Technique.

La première phase des travaux s'est concrétisée par la publication d'un ouvrage collectif : « Normalisation et Echange de Données Pédologiques par Ordinateur ».

Cet ouvrage s'appuyant sur l'expérience acquise au plan international est utile à trois points de vue :

— il présente, pour la description des sols, un langage complet qui fait la synthèse des glossaires actuellement existants et tient compte de l'enseignement fourni par les banques pédologiques déjà opérationnelles ;
— il propose une structure de coopération entre les banques existantes ou à créer. Les notions de fichier international d'échange et de banque de données de référence sont introduites à cet effet ;
— il relate les tentatives d'échange de données déjà réalisées par diverses voies et présente en annexe cinq banques de données pédologiques fonctionnant actuellement.

En dépit de diverses imperfections liées à son caractère collectif, cet ouvrage met en évidence la plupart des problèmes que l'on rencontre lorsqu'on désire bâtir une banque de données relative au domaine biologique.

A ce titre, il peut apporter une aide précieuse aux scientifiques concernés.

Une publication ultérieure fournira tous les détails nécessaires à la connexion avec le fichier international d'échange.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 11-1979

Dépôt légal : 4e trimestre 1979. N° d'impression : 26568

CPPAP n° 1426 ADEP

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1979	France Prix T.T.C.	Étranger Prix Net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix Net
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOLOGIE - ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	335 F	370 F	72 F	72 F

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

APIDOLOGIE. 4 nos par an — Abonnement : France : 80 F — Étranger sauf R. F. A. : 130 F — Le numéro: France : 25 F — Étranger sauf R. F. A. : 40 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn et M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... **60,00 F**

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... **27,00 F**

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... **38,00 F**

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... **168,50 F**

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... **168,50 F**

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... **95,50 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... **63,50 F**

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... **134,50 F**

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... **173,00 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1979, **30** (2), 109-216.

Table des matières

J. LE RENARD. — Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau. II. — Utilisation d'un modèle mathématique à trois paramètres dont un phénoménologique 109

Ph. BUSSIÈRES. — Influence des caractéristiques de particules d'amendements calcaires sur leur solubilité carbonique 121

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, D. MASSIMINO, J. P. VIVOLI, Christiane RICHAUD. — Le laboratoire $C_2$3A. Un outil au service de la physiologie de la plante entière. I. — Les chambres de culture et les systèmes de mesures associés 139

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, Jacqueline MASSIMINO, D. MASSIMINO, Christiane RICHAUD. — Le laboratoire $C_2$3A. Un outil au service de la physiologie de la plante entière. II. — Possibilités de la mini-informatique et premiers résultats 153

J. E. DELPHIN et A. Ph. CONÉSA. — Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles, dans la plaine de la Hardt. I. — Etat des réserves organiques 167

J. E. DELPHIN, A. Ph. CONÉSA. — Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles, dans la plaine de la Hardt. II. — Bilan humique 179

J. R. MARTY, A. HILAIRE. — Etudes préliminaires des effets de l'insertion du soja dans les rotations céréalières 191

Chronique des livres 213

Contents

J. LE RENARD. — Description of a method for determining the coefficient of longitudinal hydrodynamic dispersion, in an homogeneous saturated porous medium. II. — Application of a mathematical model with three parameters one of which is phenomenological 109

Ph. BUSSIÈRES. — Influence of characteristics of limestone particles on their carbonic solubility .. 121

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, D. MASSIMINO, J. P. VIVOLI, Ch. RICHAUD. — The $C_2$3A laboratory. A tool for the study of whole plant physiology. I. — The growth chambers and the associated measuring systems 139

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, J. MASSIMINO, D. MASSIMINO, Ch. RICHAUD. — The $C_2$3A laboratory. A tool for the study of whole plant physiology. II. — Possibilities of the mini-informatic and first results 153

J. E. DELPHIN, A. Ph. CONÉSA. — Evolution of the soil organic matter in an experiment of rotation, irrigation and crop residues manuring in the Hardt plain. I. — Level of the organic reserves 167

J. E. DELPHIN, A. Ph. CONÉSA. — Evolution of the soil organic matter in an experiment of rotation, irrigation and crop residues manuring in the Hardt plain. II. — Humic balance .. 179

J. R. MARTY, A. HILAIRE. — First observations on the effects obtained by introducing soya bean in cereal crop rotations 191

Book reviews 213

Les Annales agronomiques figurent dans current contents

I. N. 9036002.5

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE
D'AGRONOMIE
THIVERVAL-GRIGNON
78850
MINISTERE DE L'AGRICULTURE

annales agronomiques

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 3

inra

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron. ANAGA9 30 (3) 217-303 (1979)

FR ISSN 0003-3839.

AAG
30.3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris-Grignon, Paris Cedex 05.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie, Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des **auteurs**
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1979, **30** (3), 217-231.

Effet du gaz carbonique et de l'éclairement sur la croissance et la répartition des assimilats chez le Radis (*Raphanus sativus* L.)

Laurette COMBE

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Nous avons fait varier la croissance globale d'une plante de radis en modifiant son assimilation photosynthétique nette par des variations de l'éclairement ou de la teneur en gaz carbonique de l'air. A chaque niveau de photosynthèse correspond un niveau d'assimilats disponibles pouvant permettre la croissance des différents organes de la plante. Nous avons étudié la répartition de la matière sèche entre les cotylédons, les feuilles et les tubercules de radis au moment de la récolte, en fonction des divers traitements.

Il apparaît que, dans les conditions où la croissance de la plante est la plus forte, la distribution de la matière sèche se fait principalement vers le tubercule plutôt que vers le feuillage. Comme la répartition des assimilats dans la plante varie avec son âge, la question se pose de savoir si l'augmentation de croissance provoquée par les traitements est simplement une accélération de la croissance ou si elle provoque réellement une modification de la distribution des assimilats. Plusieurs arguments nous permettent de confirmer cette dernière hypothèse.

1. — Introduction

Les facteurs tels que maladies, accidents climatiques, équilibres minéraux, etc... mis à part, le rendement agricole d'une culture dépend essentiellement des relations entre les organes producteurs d'assimilats (les sources) et ceux qui utilisent ces derniers (les puits). En effet, la plupart du temps, la partie de la plante qui constitue la récolte est un organe accumulateur de matière sèche. Ainsi la production peut être fonction aussi bien de la capacité de la plante à fabriquer de la matière organique que de sa capacité à accumuler finalement celle-ci dans les organes récoltables.

A partir de là, plusieurs questions se posent : quel est le phénomène limitant ? Est-ce la photosynthèse qui ne fabrique pas autant de matériaux que le végétal peut en stocker, est-ce le transport des assimilats des sources vers les puits qui constitue le goulot d'étranglement, ou est-ce la capacité des puits qui ne peuvent accueillir toute

la matière possible ? Un autre problème peut se poser : le fonctionnement des sources à un niveau donné n'a-t-il pas d'effet sur la concurrence entre les puits ? Plus précisément, la répartition des assimilats entre les organes ne dépent-elle pas de la quantité qui est disponible à chaque instant ?

De nombreuses études sur les relations source-puits ont été publiées. Le caractère limitant des sources (assimilation photosynthétique foliaire) dans la production a été discuté dans de nombreux cas. Dans la série phylogénétique du blé, on observe que les variétés actuelles les plus productives ont une photosynthèse par unité de surface diminuée par rapport à leurs ancêtres à très faible rendement en grain (Evans, 1975). L'augmentation des surfaces foliaires compense en partie la perte de capacité photosynthétique mais la relation entre rendement en grain et activité photosynthétique de la feuille de l'épi est assez complexe (Planchon, 1976). Ainsi, il a été montré que le taux de photosynthèse diminue avec l'accumulation des assimilats dans la feuille au cours de la journée (Damisch, 1976). Ceci conforte l'idée selon laquelle la fonction d'assimilation foliaire dépend des possibilités d'évacuation, hors des feuilles, des produits assimilés, et donc dépend soit de la capacité du système vasculaire à transporter les assimilats vers les puits, soit de la capacité de ceux-ci à les accumuler. C'est le cas chez la pomme de terre (Frier, 1977) par exemple.

Beaucoup d'auteurs sont d'accord pour admettre que les sources comme les puits peuvent être limitants. Chaque situation particulière, combinaison d'un génotype et d'un environnement, détermine la limitation prépondérante (Tollenaar, 1977). Il faut y ajouter le stade de développement de la plante qui peut être un facteur essentiel.

L'objectif de ce travail est d'étudier les relations sources-puits sous l'angle de la distribution des assimilats, c'est-à-dire d'examiner comment les produits de la photosynthèse vont vers tel puits plutôt que vers tel autre, ce qui détermine la forme de la plante et sa production. L'étude se limitera à l'aspect quantitatif, c'est-à-dire que seule la répartition de la matière sèche entre organes sera examinée et non la composition de la matière organique.

Pour faire cette analyse du système « source-migration-puits », il faut modifier soit l'offre, soit la demande, soit le transport des assimilats (Wardlaw, 1976). Une méthode de variation de l'offre, non destructive et relativement aisée à mettre en œuvre, a été employée : on agit directement sur les facteurs de la photosynthèse en préservant l'intégrité du feuillage.

La plante étudiée est une plante à tubercule, le radis, choisie pour sa réactivité. Chez le radis, Starck (1973) a montré qu'un ombrage de 50 p. 100 appliqué tardivement diminue considérablement la croissance du tubercule, mais ne donne aucune indication précise sur l'éclairement ni sur la photosynthèse. Par ailleurs, Nilovskaya (1968) a observé que l'élévation (à 2 000 vpm) de la teneur en CO_2 de l'air augmentait la photosynthèse nette des radis et Knecht (1975) a indiqué que la teneur de 1 200 vpm de CO_2 donnait une plus grande quantité de matière fraîche à la récolte que la teneur normale. Aucun de ces deux auteurs ne fournit d'indication précise sur la répartition de la matière sèche.

De plus l'importante plasticité de la taille de son organe de stockage fait du radis un excellent matériel pour étudier l'éventuel effet limitatif des sources. Il nous a donc paru intéressant d'observer les modifications de la croissance et de la répartition de la matière sèche entre les organes en réponse à des variations du niveau d'assimilation, chez le radis, pris comme plante-modèle.

2. — Matériel et méthodes expérimentales

2.1. — *Matériel végétal*

Le radis pousse très rapidement : il acquiert très tôt (en quelques jours) un fonctionnement schématique, caractérisé par une accumulation d'assimilats dans l'hypocotyle (c'est l'organe qui tubérise) à partir de la photosynthèse de la couronne de feuilles. Son faible encombrement le rend très manipulable et il a une géométrie simple, du moins jusqu'au stade étudié (trois semaines après la levée) : une racine pivotante, un hypocotyle tubérisé et une rosette de feuilles comprenant les deux feuilles cotylédonaires et deux à trois paires de feuilles (Fredon, 1976).

Nous avons utilisé une variété adaptée à la culture en serre. Il s'agit de la variété Serra (Clause) ; génétiquement, c'est une population. Les graines sont calibrées par l'obtenteur afin de diminuer l'hétérogénéité de la population.

2.2. — *Conditions de culture*

Les cultures de radis ont été réalisées dans des bacs de sable arrosé de solution nutritive complète (Coïc et Lesaint, 1975). La température était maintenue autour de 19-20 °C le jour et de 13-14 °C la nuit. La durée d'éclairement était d'au moins 14 h par jour car la tubérisation des radis n'a lieu qu'en jours longs. Un éclairage d'appoint était donc utilisé, constitué de lampes au sodium haute pression fournissant un éclairement de 40 Wm^{-2} (visible). La densité de semis était normalement de trois cents graines m^{-2} soit trente graines m^{-1} sur des lignes espacées de 10 cm. En serre, une partie des plantes a été semée dans des pots où la densité s'élevait à 1 000 m^{-2}, soit trois plantes par pot de 7 cm de diamètre, d'autres essais avaient une densité plus faible que la normale : cent soixante-cinq ou deux cents plantes m^{-2}.

Dans ces conditions, les graines semées levaient en 5 jours et formaient des radis d'une taille commerciale en 21 à 26 jours après le semis selon la densité, l'éclairement et la concentration en CO_2.

Une partie des expériences a été faite en serre en hiver, l'éclairement moyen reçu par ces cultures était faible (55 Wm^{-2}, visible) malgré l'éclairage d'appoint. Une autre partie a eu lieu en chambres climatisées avec un éclairage puissant constitué de deux lampes HQI OSRAM aux halogènes métalliques pour 1 lampe SONT à vapeur de sodium haute pression donnant un éclairement constant de 230 Wm^{-2} (visible).

La teneur en gaz carbonique de l'air était contrôlée à l'aide d'un analyseur infrarouge. Deux systèmes de régulation de la concentration en CO_2 ont été mis au point. Pour les essais en serre un tunnel en polyéthylène était posé sur les cultures, l'enrichissement à 950 vpm (volumes par million) de CO_2 se faisait par injection de gaz à partir d'une bouteille dans une gaine ventilée à l'entrée du tunnel, le maintien de la teneur normale de 350 vpm était réalisé par une ventilation avec l'extérieur. Pour les cultures en chambres climatisées, l'air étant en circuit fermé, un autre système de régulation était nécessaire : l'analyseur équipé d'un détecteur de seuil commandait l'enrichissement à partir d'une bouteille, ou l'appauvrissement par passage sur de la chaux sodée.

2.3. — *Protocole expérimental*

Pour modifier les quantités d'assimilats disponibles nous avons fait varier le niveau d'éclairement et la teneur en CO_2, facteurs qui agissent considérablement sur la photosynthèse nette. Les autres facteurs tels que l'eau ou la température ont été maintenus aussi constants que possible.

Deux niveaux d'éclairement (E faible : 55 $\pm$ 10 Wm^{-2} en serre et E fort : 230 $\pm$ 30 Wm^{-2} en cellule climatisée) et deux niveaux de teneur en CO_2 (teneur normale : 350 $\pm$ 50 vpm et fumure carbonée : 950 $\pm$ 50 vpm) ont été combinés. Pour rechercher à quels stades l'augmentation des assimilats provoque une augmentation de la production (ce qui signifie qu'alors la photosynthèse est un facteur limitant), la fumure carbonée peut être appliquée non pendant toute la culture, mais uniquement pendant un stade de végétation (Krenzer, 1974). C'est pourquoi il y a eu deux types de traitements : les uns (éclairement et CO_2) sur toute la durée de végétation, les autres (CO_2 uniquement) d'une semaine seulement en début ou en fin de culture. D'autre part l'effet de densités variables a été examiné dans quelques cas.

Des prélèvements de plantes ont été effectués tous les 3 ou 4 jours, du 6e au 26e jour pour étudier la dynamique de croissance en matière sèche (pesée après 48 h à 100 °C) des différents organes : cotylédons, feuilles et tubercules ; les racines n'étaient récupérées que dans les essais en pots.

Des mesures de la capacité d'assimilation nette du feuillage de plantes en pot en éclairement saturant en fonction de la teneur en CO_2 ont été faites les mêmes jours que les mesures de croissance. La chambre d'assimilation fonctionne en circuit ouvert, la température est maintenue constante (20 °C) seuls les échanges de gaz carbonique (et non ceux de vapeur d'eau) sont mesurés. Toute la partie aérienne des plantes était introduite dans la chambre, il n'y avait pratiquement pas de recouvrement entre les feuilles. La surface des feuilles a été mesurée avec un planimètre optique.

Une fois connue la dynamique de croissance, on s'est limité à la mesure des poids de matière fraîche et de matière sèche à la récolte (23 ou 26 jours après le semis).

Les résultats présentés ici ont été obtenus sur une quarantaine d'expériences effectuées à Versailles de novembre 1977 à mars 1979. Les valeurs qui figurent dans les tableaux sont des moyennes portant sur des échantillons de trente à cinquante plantes avec 4 répétitions au moins. Le degré de signification des différences a été calculé par le test t de Student.

3. — Résultats

Les résultats peuvent être regroupés en trois parties : étude de la dynamique de croissance en matière sèche des différents organes du radis, comparaison des effets des différents traitements sur le poids de la partie aérienne et la répartition de la matière sèche à la récolte, enfin étude des effets de certains traitements sur la croissance et le fonctionnement du système foliaire.

3.1. — *Dynamique de croissance des différents organes du radis*

La dynamique de croissance a été étudiée sur les plantes cultivées en serre. La figure 1 montre l'évolution de la croissance globale (sauf racines) en matière sèche en

fonction de l'âge de la plante, les courbes représentant chaque type d'organe sont également tracées. On voit que la croissance des feuilles s'accélère lorsque les cotylédons commencent à se vider. La croissance du tubercule est très lente au début et ne dépasse celle des feuilles que trois semaines après le semis.

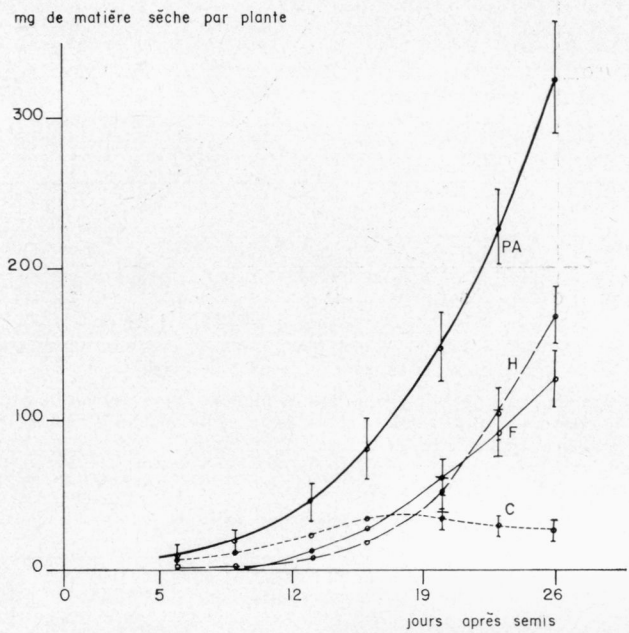


FIG. 1. — *Dynamique de croissance en matière sèche des différents organes.*

En abscisse : l'âge ; en ordonnée : la matière sèche par plante. PA—— ensemble de la partie aérienne, C - - - cotylédons, F — — feuilles vraies, H —— hypocotyles (PA = F + C + H) (moyennes de 16 répétitions), les barres verticales représentent l'intervalle de confiance de probabilité 5 p. 100. Radis cultivés en serre : éclairement : 55 Wm^{-2}, densité : 300 pl m^{-2}, $[CO_2]$ = 350 vpm.

Dry matter growth dynamics of the different organs.

Abscissa : age (days from sowing) ; Ordinate : dry matter $plant^{-1}$.
PA : whole aerial part, C : cotyledons, F : leaves, H : hypocotyls. Plants in glasshouse : irradiance = 55 Wm^{-2}, density = 300 pl m^{-2}, $[CO_2]$ = 350 vpm.

Sur la figure 2, on voit l'évolution de la répartition de la matière sèche exprimée en pourcentage de chaque organe par rapport à l'ensemble de la partie aérienne (bien que l'hypocotyle soit partiellement épigée, nous appelons partie aérienne l'ensemble de la plante moins les racines). Ces courbes ont été établies avec des radis élevés en atmosphère normale, sous faible éclairement et à la densité normale. Pour les plantes cultivées en pots (forte densité, serre éclairement 55 Wm^{-2}) nous avons pu extraire et peser les racines. La proportion de matière sèche dans les racines par rapport à l'ensemble de la plante passe de 19 p. 100 à 33 p. 100 du 6e au 15e jour puis décroît très rapidement (10 p. 100 au 26e jour) quand le tubercule commence à accumuler intensément les matériaux. La racine constitue un puits important surtout en

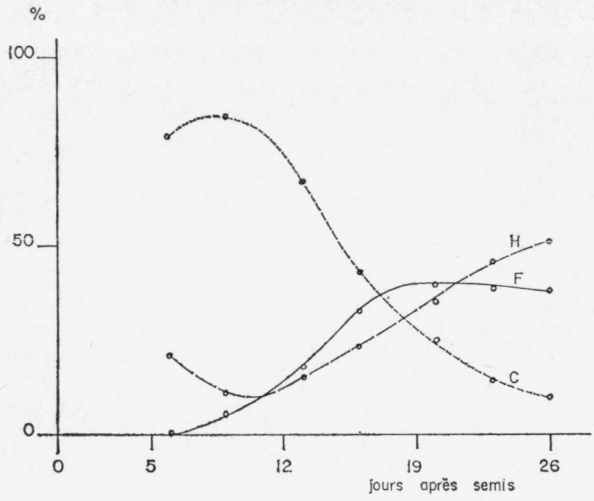


FIG. 2. — *Répartition de la matière sèche aérienne en fonction de l'âge.*

En abscisse : l'âge, en ordonnée : la proportion de matière sèche de chaque organe exprimée en pourcentage du contenu total de matière sèche de la partie aérienne, même légende et mêmes conditions de culture que dans le cas de la figure 1.

Dry matter distribution in aerial part against age.

Ordinate : percentage of dry matter of each organ with respect to the whole aerial part dry mater. Same legend as figure 1.

début de végétation quand l'hypocotyle n'est pas encore tubérisé. Il en est de même dans une proportion moindre pour les jeunes feuilles.

Le stade auquel nous avons arrêté notre étude (26 jours après le semis) correspond à quelques jours de plus que la récolte dans la pratique, il se situe encore en pleine phase de croissance (exponentielle) végétative : le tubercule est loin d'avoir sa taille maximale et les feuilles ne cessent d'apparaître et de grandir dans les jours qui suivent la récolte (normalement 23 jours après le semis).

Nous allons examiner maintenant l'effet des différents traitements (éclairement, CO_2 et densité) sur les phénomènes de croissance et de répartition de la matière sèche à la récolte.

3.2. — *Effet de l'éclairement, du gaz carbonique et de la densité sur le poids et la répartition de la matière sèche à la récolte*

Le tableau 1 montre que l'éclairement n'a pas beaucoup d'effet sur la croissance globale, mais modifie nettement la répartition de la matière sèche. Le passage de l'éclairement faible à l'éclairement fort, n'accroît la matière sèche totale que de 11 p. 100 (non significatif au seuil de 5 p. 100) mais s'accompagne d'une augmentation de la proportion de matière sèche (différence significative au seuil de 1 p. 100) dans le tubercule. Autrement dit, sous un éclairement plus fort la plante fabrique un tubercule plus lourd avec moins de feuilles.

TABLEAU 1

Effet de l'éclairement sur la croissance et la répartition de la matière sèche entre les organes (H : hypocotyle tubérisé, F : feuille vraie, C : cotylédons) *de radis âgés de 23 jours*

Irradiance effect on dry matter growth distribution (H : tuber, F : leaves, C : cotyledons) *in 23-day-old radish*

Eclairement Wm^{-2}	Densité pl m^{-2}	$[CO_2]$ vpm	Matière sèche totale mg pl^{-1}	Matière sèche totale g m^{-2}	Matière sèche tubercule mg pl^{-1}	Répartition H p. 100	Répartition F p. 100	Répartition C p. 100
55 (serre)	300	350	220	66,0	102	46	39	15
230 (enceinte)			245 n. s.	73,5	135	55 **	32	13

Pour tous les tableaux la différence avec la première ligne est { ** significative au seuil de 1 p. 100 ; * significative au seuil de 5 p. 100 ; n.s. non significative au seuil de 5 p. 100.

L'effet de la fumure carbonée est montré dans le tableau 2. Si la fumure est appliquée jour et nuit pendant toute la durée de la culture, il y a une nette augmentation (+ 27 p. 100 significative au seuil de 5 p. 100) de la production par plante qui s'accompagne seulement d'une tendance à l'accroissement de la proportion de matière dans le tubercule (non significatif au seuil de 5 p. 100). Par contre, si l'augmentation de teneur en CO_2 n'a lieu que pendant le jour (et non la nuit), l'accroissement de la production par plante est encore plus fort (+ 59 p. 100, significatif au seuil de 1 p. 100) et

TABLEAU 2

Effet de la fumure carbonée (pendant toute la durée de végétation) *sur la croissance et la répartition de la matière sèche entre les organes* (H : hypocotyle tubérisé, F : feuilles vraies, C : cotylédons) *de radis âgés de 23 jours*

CO_2 *effect on dry matter growth and distribution in 23-day-old radish*

Eclairement Wm^{-2}	Densité pl m^{-2}	$[CO_2]$ vpm	Matière sèche totale mg pl^{-1}	Matière sèche totale g m^{-2}	Matière sèche tubercule mg pl^{-1}	Répartition H p. 100	Répartition F p. 100	Répartition C p. 100
230	300	350	245	73,5	135	55	32	13
		950 jour et nuit	310 *	93,0	180	58 n. s.	32	10
		950 jour	390 **	117,0	205	65 **	23	12

s'accompagne cette fois d'une nette modification de la répartition : l'hypocotyle accumule 65 p. 100 de la matière sèche totale, au lieu de 55 p. 100 (accroisssement significatif au seuil de 1 p. 100).

Au plan pratique, un aspect intéressant concerne la matière fraîche : la fumure carbonée (de jour et nuit) entraîne un accroissement de la matière fraîche totale de la partie aérienne de 34 p. 100 (significatif au seuil de 5 p. 100) et surtout de la matière fraîche au niveau du tubercule (+ 47 p. 100, significatif au seuil de 1 p. 100). La fumure carbonée de jour produit le même effet. L'augmentation d'assimilation par le gaz carbonique est donc correlée avec une certaine accumulation d'eau dans le puits. L'effet du gaz carbonique est donc complexe, nous en reparlerons plus loin.

Le tableau 3 donne la comparaison de la croissance des radis pour trois densités. Pour une teneur en CO_2 normale, une forte densité diminue la quantité de matière

TABLEAU 3

Effet de la densité (dans deux cas de [CO_2]) *sur la croissance et la répartition de la matière sèche entre les organes* (H : hypocotyle tubérisé, F : feuilles vraies, C : cotylédons) *de radis âgés de 23 jours*

3 (1) : *en atmosphère normale* (350 vpm CO_2)
3 (2) : *en atmosphère enrichie en* CO_2 (950 vpm CO_2)

Density effect on dry matter growth and distribution in 23-day-old radish

3 (1) : *normal* CO_2 *ambient* (350 vpm)
3 (2) : *high* CO_2 *ambient* (950 vpm)

	Eclairement Wm^{-2}	Densité pl m^{-2}	[CO_2] vpm	Matière sèche totale mg pl^{-1}	Matière sèche totale g m^{-2}	Matière sèche tubercule mg pl^{-1}	Répartition H p. 100	Répartition F p. 100	Répartition C p. 100
3 (1)	230	1 000	350	184	184,2	98	53	35	12
		300		245 *	73,5	135	55 n. s.	32	13
3 (2)	230	300	950	390	117,0	205	65	23	12
		200		602 **	120,4	362	74 **	18	8

sèche par plante de 25 p. 100 (significatif au seuil de 5 p. 100), mais multiplie la production à l'unité de surface de sol par 2,5, et les différences dans la répartition ne sont pas significatives. Une densité moins élevée que la normale à forte teneur en CO_2 le jour permet d'accroître fortement (+ 54 p. 100, significatif au seuil de 1 p. 100) la production par plante sans modifier significativement la quantité produite par unité de surface de sol, mais change la répartition entre les organes : il y a une plus forte proportion de matière sèche dans les tubercules (différence significative au seuil de 1 p. 100). L'effet d'une diminution de la densité est donc semblable à celui d'une augmentation de l'éclairement ou de la teneur en CO_2 sur la croissance par plante (augmentation), comme sur la répartition : moins de matière sèche foliaire et plus dans les tubercules.

Les résultats des traitements CO_2 de durée partielle sont donnés dans le tableau 4. En éclairement faible et densité normale, la fumure carbonée précoce fait diminuer (— 13 p. 100, significatif au seuil de 5 p. 100) la matière sèche totale, et la fumure carbonée tardive n'a d'effet significatif ni sur la croissance ni sur la répartition. Par

TABLEAU 4

Effet d'une fumure carbonée partielle (une semaine) sur la croissance et la répartition de la matière sèche entre les organes
(H : hypocotyle tubérisé, F : feuilles vraies, C : cotylédons) *de radis âgés de 26 jours*

4 (1) : *en lumière faible*
4 (2) : *en lumière forte*

Fumure carbonée partielle (950 vpm, 1 semaine jour et nuit)

(*a*) en début de culture (5e-12e jour)
(*b*) en fin de culture (19e-26e jour)

Effect of partial treatment by high CO_2 on dry matter growth and distribution in 26-day-old radish

4 (1) : *low irradiance* (55 Wm^{-2} *visible*)
4 (2) : *high irradiance* (230 Wm^{-2} *visible*)

Partial high CO_2 treatment (one week only) with 950 vpm CO_2 night and day

(*a*) at the start (from the 5th to the 12th day)
(*b*) at the end (from the 19th to the 26th day)

	Eclairement Wm^{-2}	Densité pl m^{-2}	$[CO_2]$ vpm	Matière sèche totale mg pl^{-1}	Matière sèche totale g m^{-2}	Matière sèche tubercule mg pl^{-1}	Répartition H p. 100	Répartition F p. 100	Répartition C p. 100
			350	316	94,8	168	53	37	10
4 (1)	55	300	(*a*) 950 → 350	285 *	85,5	142	50 n. s.	40	10
			(*b*) 350 → 950	322 n. s.	96,6	171	53 n. s.	37	10
			(*a*) 950 → 350	504	83,2	324	64	27	9
4 (2)	230	165	(*b*) 350 → 950	423 *	69,8	250	59 *	30	11

contre, en éclairement fort et densité faible, la fumure carbonée précoce a un effet positif (+ 19 p. 100, significatif au seuil de 5 p. 100) sur la croissance totale et sur la répartition dans le tubercule (64 p. 100 au lieu de 59 p. 100, significatif au seuil de 5 p. 100) par rapport au traitement tardif.

Nous avons vu que l'effet d'une augmentation de l'éclairement allait dans le même sens que celui d'une diminution de la densité, nous pouvons donc dire qu'en éclairement satisfaisant, la fumure carbonée appliquée dès la levée permet un accroissement de la production totale et particulièrement des tubercules, alors qu'en éclaire-

ment faible on constate un effet contraire. Pour expliquer cela nous allons voir maintenant la croissance et le fonctionnement du feuillage des radis et leur modification par certains traitements.

3.3. — *Croissance et fonctionnement de l'appareil photosynthétique*

Pendant la germination, les cotylédons verdissent et grandissent rapidement. On voit sur la figure 3 l'évolution de la matière sèche et de la surface des feuilles cotylédonaires de radis cultivés en éclairement faible, à densité et teneur en CO_2 normales. La masse surfacique décroît de 1 mg cm^{-2} à 0,7 mg cm^{-2} (16e jour) puis reste constante. On voit que la diminution de surface des cotylédons s'accompagne d'une diminution proportionnelle de leur contenu en matière sèche et traduit leur nécrose progressive.

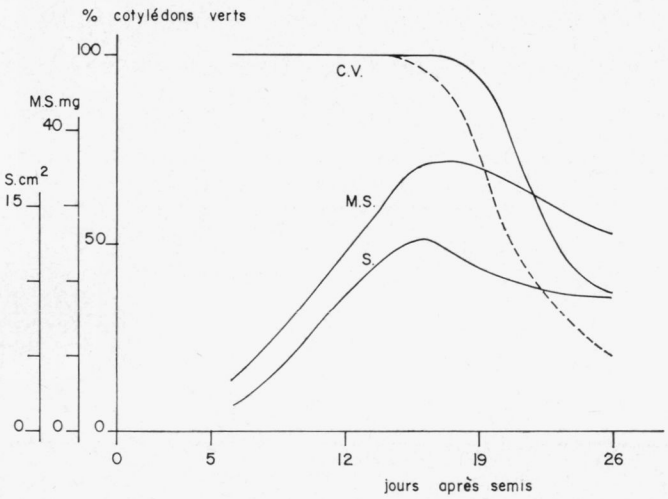


FIG. 3. — *Croissance et flétrissement des feuilles cotylédonaires, effet d'une fumure carbonée précoce.*

En abscisse : l'âge, en ordonnée : M.S. matière sèche par plante, S. surface par plante, C.V. pourcentage de cotylédons encore verts (moyenne de 4 répétitions). Radis cultivés en serre : éclairement 55 Wm^{-2}, densité 300 pl m^{-2}, $[CO_2] = 350$ vpm pour les témoins —— et 950 vpm du 5e au 12e jour pour la fumure carbonée précoce ------.

Cotyledons growth and withering, effect of early high CO_2.

M.S. : dry matter $plant^{-1}$; S. : surface $plant^{-1}$; C.V. : percentage of green cotyledons ; Treatment : 950 vpm CO_2 from 5th to 12th days after sowing.

La courbe indiquant les variations de pourcentage de cotylédons toujours verts en fonction de l'âge (fig. 3) montre que le flétrissement a lieu à partir du 18e jour chez les plantes cultivées à 350 vpm de CO_2. Dans toutes les conditions d'éclairement, une fumure carbonée pratiquée dès la levée accélère le jaunissement des cotylédons. Un exemple en est donné sur la figure 3 : en éclairement faible les cotylédons des plantes traitées précocement par le CO_2 se flétrissent 3 jours plus tôt que les plantes restées à teneur en CO_2 normale.

Pour les feuilles vraies, on voit (fig. 4) que les courbes de croissance de surface et de masse restent parallèles, la masse surfacique donc reste constante et égale à

2,0 mg cm^{-2} chez les plantes témoins. Les plantes traitées par une teneur élevée en CO_2 présentent une masse de matière sèche foliaire plus faible et une surface encore plus faible (la masse surfacique est de 2,2 mg cm^{-2}). Par ailleurs, d'autres mesures montrent que le traitement par une forte densité a un effet comparable, en plus prononcé (non montré sur les figures) sur les feuilles, mais n'a pas autant d'effet sur le jaunissement des cotylédons que la fumure carbonée.

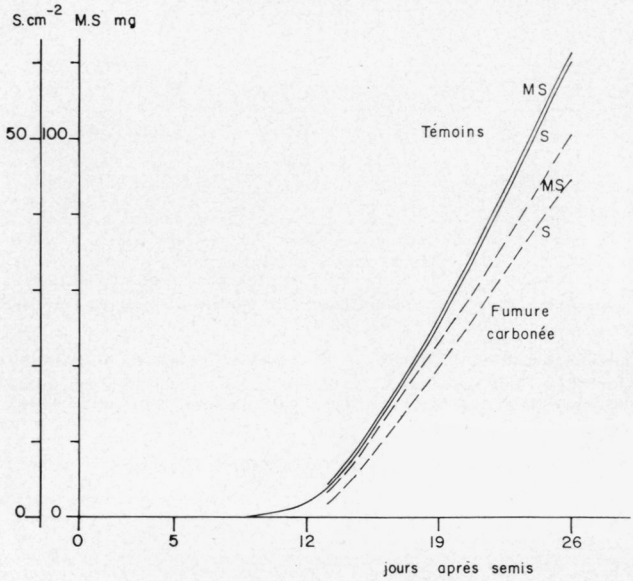


FIG. 4. — *Croissance des (vraies) feuilles, effet d'une fumure carbonée précoce.*
Même légende et mêmes conditions de culture que dans le cas de la figure 3.

Leaves growth. Effect of early high CO_2
Same legend as figure 3.

Les mesures d'assimilation nette montrent que le taux de photosynthèse à l'unité de surface diminue avec l'âge, mais comme la surface du feuillage (cotylédons et feuilles) augmente, l'assimilation par plante se multiplie par 10 entre le 6e et le 23e jour pour des radis élevés en lumière faible, en pots et à teneur en CO_2 normale. Une augmentation de l'intensité de l'éclairement ou de la teneur en CO_2 accroît le taux d'assimilation, mais il faut noter que le gain d'assimilation pour une fumure carbonée à 1 000 vpm par rapport à la teneur normale est variable selon l'éclairement (un exemple est donné fig. 5). La fumure carbonée n'ayant qu'une faible efficacité sur la photosynthèse en lumière basse, cela explique pourquoi elle ne produit pas d'effet significatif positif sur la croissance des radis poussant sous un faible rayonnement (voir tabl. 4).

Le fait que le traitement précoce à 950 vpm de CO_2 provoque un dessèchement plus rapide des cotylédons, peut aussi expliquer pourquoi, chez les radis élevés en lumière faible, ce traitement fait diminuer la production totale (tabl. 4, haut) puisque la photosynthèse n'est pas augmentée et que la durée de fonctionnement des cotylédons est diminuée ; la figure 4 montre d'ailleurs comment la croissance des feuilles

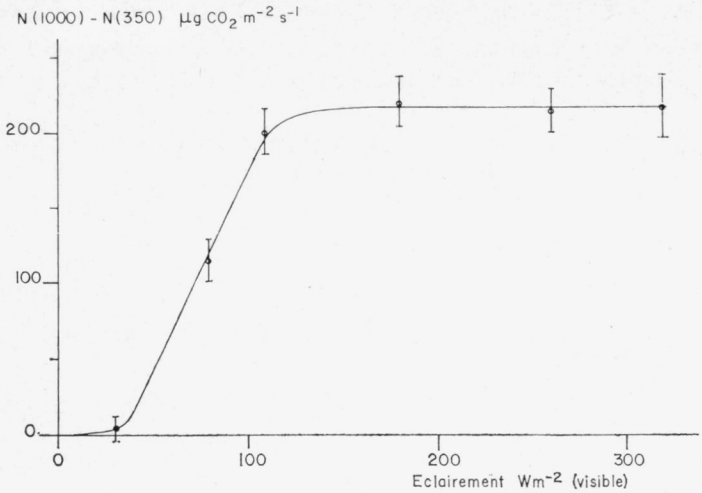


FIG. 5. — *Gain d'assimilation nette de plantes isolées, par la fumure carbonée à 1 000 vpm en fonction de l'éclairement.*

En abscisse : l'éclairement; en ordonnée : la différence entre le taux d'assimilation nette (à l'unité de surface de feuille) à 1 000 vpm de CO_2 et le taux à 350 vpm (moyennes de 6 répétitions). Radis âgés de 13 jours après le semis, élevés en serre : éclairement : 130 Wm^{-2}, densité : 300 pl m^{-2}, CO_2 = 350 vpm.

FIG. 5. — *Net assimilation gain by high* CO_2 *(1 000 vpm) against irradiance.*

Abscissa : irradiance (Wm^{-2} visible) ; Ordinate : difference between net assimilation rate ; at 1 000 vpm and at 350 vpm CO_2.

est freinée par ce traitement. Par contre, en lumière forte, l'accroissement de photosynthèse par le CO_2 compense, et au-delà, la diminution de la durée de vie des cotylédons.

4. — Discussion

Nous allons maintenant essayer d'abord de comprendre à quoi correspondent les différences de croissance globale observées dans les traitements puis, sachant comment le fonctionnement des sources a été modifié par ceux-ci, de voir si la répartition entre les puits s'en est trouvée changée aussi.

4.1. — *La croissance en matière sèche*

Nous avons vu que l'effet de la densité est semblable à celui de l'éclairement. Lorsque la densité est très élevée il y a une meilleure couverture du sol en début de culture donc une meilleure interception du rayonnement incident par la culture qui explique un meilleur rendement au m^2. Lorsque la densité est normale, le feuillage d'une plante est partiellement recouvert par celui de ses voisins (recouvrement d'un tiers à un demi lors de la récolte) et reçoit moins de lumière qu'une plante isolée ou quasi, comme c'est le cas pour les faibles densités. Dans ce dernier cas, la croissance par plante est augmentée mais non la croissance à l'unité de surface de sol.

L'effet du gaz carbonique est complexe : il semble que le métabolisme nocturne

soit sensible à la concentration en CO_2 (voir tabl. 2). S'agit-il d'un effet du CO_2 sur la respiration ou sur un autre phénomène nocturne tel que le déstockage des feuilles ? A moins que l'alternance des teneurs en CO_2 n'ait un effet direct, il y aurait un « carbo-périodisme » comme il y a un thermo-périodisme...

Le maintien d'un taux élevé de CO_2 dans l'atmosphère n'a pas, en général, autant d'effet que la réponse photosynthétique instantanée le laisserait penser. Le traitement par le CO_2 peut avoir un effet sur la courbe de réponse de l'assimilation nette au CO_2. Les plantes élevées à une forte teneur de CO_2 réagissent quelquefois moins que les plantes témoins, cela dépend en particulier de l'éclairage de croissance qui accompagne la fumure carbonée (cas de la laitue, Robelin et Martignac, 1974). Une étude précise des courbes de réponse au CO_2 du radis fera l'objet d'une prochaine publication.

La comparaison du tableau 2 et de la figure 5 (l'augmentation relative de la photosynthèse à saturation lumineuse est de 40 p. 100, car le taux d'assimilation nette à 350 vpm au plateau de saturation lumineuse est de 550 μg de CO_2 par m^2 de feuille et par seconde) fait penser que dans le cas de l'enrichissement en CO_2 jour et nuit, il y a un effet de freinage de l'assimilation par l'accumulation des assimilats dans les feuilles (Raper et Peedin, 1978).

Si cette hypothèse est vérifiée, des fumures de courte durée à des moments privilégiés devraient être plus efficaces. Les expériences de fumure carbonée partielle, c'est-à-dire d'une seule semaine, montrent que chez le radis, c'est surtout la fumure précoce (a) qui permet d'accroître la production lorsque l'éclairement est suffisant (tabl. 4). Chez le blé, Krenzer (1974) a montré que la production de grains n'était augmentée que si la fumure était appliquée pendant la phase de différenciation florale ou pendant la phase de maturation des grains mais n'avait aucun effet si elle était faite pendant la croissance végétative.

Cependant c'est la phase de mise en place de l'appareil photosynthétique du blé. La différence de comportement du blé et du radis de ce point de vue, peut être en relation avec la nature de leurs organes de stockage : le puits du radis est l'hypocotyle, différencié très tôt, à croissance indéfinie purement végétative, alors que les grains de blé sont des fruits en nombre défini.

Le rôle des cotylédons dans la croissance du radis a été montré par le travail de Suzuki (1976). Dans une première phase, les feuilles se développent aux dépens des réserves et des produits de l'assimilation des cotylédons. La seconde phase correspond au grossissement de l'hypocotyle qui devient le puits le plus actif et qui accumule les assimilats produits par les feuilles. Cette dernière phase est donc conditionnée par la première.

L'expérience de fumure carbonée du 5e au 12e jour pour des plantes cultivées à éclairement bas montre bien cette dépendance de la croissance globale, par rapport au fonctionnement photosynthétique des cotylédons. Autrement dit, chez le radis l'assimilation des cotylédons (du 5e au 12e jour) peut être un facteur limitant de la production, comme le confirment les expériences d'ablation précoce des cotylédons de Suzuki (1976).

4.2. — *La répartition entre les puits*

En même temps que le poids total augmente, la part de matière sèche dans les tubercules s'accroît avec l'âge (fig. 1 et 2). Lorsqu'un traitement provoque un gain de

poids total et une modification de la répartition en faveur du tubercule, la question se pose de savoir s'il s'agit du résultat simplement d'une accélération de la croissance due à l'activité plus grande des sources ou d'un effet direct du traitement sur la répartition.

Deux arguments vont à l'encontre de la première hypothèse. On ne constate pas d'accroissement significatif du nombre de feuilles chez les radis à croissance renforcée. De plus, le vidage (perte de matière sèche) des cotylédons ne s'accélère pas quand le traitement accroît le poids total (cas des plantes élevées en lumière forte avec une fumure carbonée de jour et nuit).

Les changements de poids ne s'accompagnent pas toujours d'une modification de la répartition (tabl. 2). Inversement, il peut y avoir modification de la répartition sans changement de poids à la récolte, c'est le cas avec l'éclairement (tabl. 1). Starck (1973) observe aussi cet effet de l'éclairement sur la répartition de la matière sèche.

Les traitements modifiant le niveau de photosynthèse ont donc eu deux effets distincts, l'un sur la croissance globale (qu'on peut considérer comme le reflet du fonctionnement des sources), l'autre sur la répartition de la matière sèche entre les organes (on peut considérer la croissance des différents organes comme un reflet du fonctionnement des puits). En général, l'augmentation de l'assimilation permet une meilleure croissance de l'ensemble de la partie aérienne et accroît plus particulièrement le poids des tubercules qui sont les puits principaux au stade de la récolte.

Reçu pour publication en juillet 1979.

Remerciements

Je remercie MM. Bertolini et Jaussely pour la mise au point des systèmes originaux de régulation de la teneur en gaz carbonique en serre et en enceinte climatisée.

Summary

Growth and dry matter distribution responses of radish plants to different levels of irradiance and carbon dioxide concentration

Changes of total growth of radish plants were obtained through different net photosynthesis levels by means of varied irradiances or carbon dioxide concentrations. Each assimilation level provides the rate of assimilates available for the growth of the different organs. Dry matter distribution between cotyledons, leaves and tubers of radishes was studied for each treatment at harvesting time.

When the growth rate increases, the dry matter distribution seems more favourable to hypocotyls than to the foliage. Dry matter distribution in plants changes with age. But the alterations in the scheme of distribution by the treatments are due to a direct effect of the level of assimilates in the plants and not to an accelerated growth.

Zusammenfassung

Über die Einwirkung des Kohlendioxyds und der Beleuchtung auf das Wachstum und die Verteilung der Assimilate beim Rettich (Raphanus sativus *L.*)

Wir haben das Gesamtwachstum einer Rettichpflanze unterschiedlich gestaltet durch Abänderung seiner reinen photosynthetischen Assimilation indem wir die Beleuchtung oder den Kohlendioxydgehalt der Luft verschieden einstellten. Jedem Stadium der Photosynthese entspricht eine bestimmte. Stufe, der zur Verfügung stehenden Assimilate die das Wachstum der verschiedenen Pflanzenorgane erlauben. Wir haben bei der Ernte die Verteilung der Trockensubstanz zwischen Samenlappen, Blätter und Knollen des Rettichs entsprechend den verschiedenen Behandlungen untersucht.

Es zeigt sich, dass bei ded Bedingungen, bei denen das Wachstum der Pflanze am stärksten ist, die Trockensubstanz sich hauptsächlich in die Knollen verteilt als in die Blätter.

Da die Verteilung der Assimilate in der Pflanze sich bei deren Alter ändert, besteht die Frage, ob das zunehmende, durch die Behandlung hervorgerufene Wachstum eine einfache Beschleunigung des Wachstums ist, oder ob das zunehmende Wachstum in Wirklichkeit eine Änderung der Assimilateverteilung hervorruft.

Verschiedene Argumente erlauben uns die letztere Annahme zu bestätigen.

РЕЗЮМЕ

Влияние углекислого газа и освещения на рост и распределение ассимилятов у редиски (*Raphanus sativus* L.)

КОМБ Л.

Мы изменили общий рост растения редиски, изменяя его чистую фотосинтетическую ассимиляцию с помощью колебаний освещения или содержания воздушного углекислого газа. Каждому уровню фотосинтеза соответствует определённый уровень свободных ассимилятов для роста разных органов растения. Мы изучили распределение сухого вещества между семядолями, листьями и клубнями во время урожая в зависимости от обработок.

Показано, что сухое вещество распределяется скорее по клубням чем по листьям в условиях самого сильного роста растения. Принимая во внимание, что распределение ассимилятов по растению зависит от возраста, подлежит обсуждению следующий вопрос : увеличение роста, вызванное обработками, является простым ускорением роста или изменяет действительно распределение ассимилятов.

Несколько аргументов позволяют нам утвердить второе предположение.

Références bibliographiques

APEL P., 1976. Relations between photosynthesis performance and yield production of cereals. *Wiss. Z. Humboldt-Univ., Berlin Math. Nat. Reihe*, **25** (6), 747-751.

COIC Y., LESAINT C., 1975. La nutrition minérale et en eau des plantes en horticulture avancée. *Doc. Tech. S. C. P. A.* **23**, 22 p.

DAMISCH W., 1976. On the relations between yield production and CO_2 gaseous interchange of Wheat (*Triticum aestivum*). *Wiss. Z. Humboldt-Univ., Berlin Math. Nat. Reihe*, **25** (6), 752-758.

EVANS L. T., 1975. *Crop physiology. Some case histories*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 374 p.

FREDON J. J., 1976. *Histogenèse et physiologie des tissus conducteurs du Radis*. Thèse Univ. Limoges, 15 avril 1976, 145 p.

FRIER V., 1977. The relationship between photosynthesis and tuber growth in *Solanum tuberosum* L. *J. Exper. Bot.*, **28** (105), 999-1007.

KNECHT G. N., 1975. Response of radish to high CO_2. *Hort. Science*, **10** (3), 274-275.

KRENZER E., 1974. *Source sink relationships in Wheat as affected by photoperiod and CO_2 concentration*. Thèse, Univ. Microfilms, Ann Arbor (Mich. USA), 50 p.

NILOVSKAYA N. T., 1968. Photosynthesis and respiration in vegetable plants exposed to various carbon dioxide concentrations. *Soviet Plant Physiol.*, **15**, 853-858.

PLANCHON C., 1976. Essai de détermination de critères physiologiques en vue de l'amélioration du Blé tendre : les facteurs de la photosynthèse de la dernière feuille. *Ann. Amélior. Plantes*, **26** (4), 717-744.

RAPER C. D., PEEDIN G. F., 1978. Photosynthetic rate during steady state growth as influenced by carbon dioxide concentration. *Bot. Gaz.*, **139** (2), 147-149.

ROBELIN M., MARTIGNAC M., 1975. Contribution à l'étude de la fumure carbonique sous serre. In : « *Phytotronics in agricultural and horticultural research* », Phytotronics III, Chouard P., de Bilderling N. Ed., Gauthier-Villars, Paris, 305-317.

STARCK Z., 1973. The effect of shading during growth on the subsequent distribution of ^{14}C assimilates in *Raphanus sativus*. *Bull. Acad. Pol. Sci., ser. Sci. Biol.*, Cl. 5, **21** (4), 309-314.

SUZUKI S., 1976. The role of cotyledons in growth and photosynthesis of Radish plants. *J. Japan Soc. Hort. Sci.*, **45** (3), 275-282.

TOLLENAAR M., 1977. Sink source relationships during reproductive development in Maize. A review. *Maydica*, **22** (2), 49-75.

WARDLAW I. F., 1976. Assimilate partitioning : cause and effect. In : « *Transport and transfer processes in plants* », Wardlaw I. F., Passioura J. B. Ed., Academic Press, New York, 381-391.

Ann. agron., 1979, **30** (3), 233-245.

Détermination du coefficient de diffusion moléculaire de solutés dans des milieux poreux saturés en eau

Agnès HUBERT et R. CALVET

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 Versailles

Résumé

Ce mémoire présente une méthode de détermination du coefficient de diffusion moléculaire d'un soluté dans un milieu poreux saturé en eau, mis en contact avec une solution agitée, de volume fini. Les différentes phases expérimentales sont décrites et la précision de la méthode est évaluée. Deux exemples d'application sont ensuite présentés :

— Les coefficients de diffusion de ^{36}Cl et ^{3}H dans des milieux poreux non consolidés (sables broyés et pierre ponce) sont mesurés ; on essaie d'en déduire des informations sur les propriétés de l'espace poral des milieux étudiés ; on montre en particulier que le rapport D_0/D_p entre le coefficient de diffusion moléculaire en phase liquide et le coefficient apparent de diffusion dans les pores ne doit pas toujours être assimilé à la tortuosité du milieu poreux.

— Une méthode simple d'évaluation du coefficient de diffusion de plusieurs herbicides en solution aqueuse est proposée.

Introduction

La connaissance des coefficients de diffusion moléculaire dans les milieux poreux est indispensable pour étudier les phénomènes de transport des solutés. Elle permet également d'obtenir, dans certaines conditions, des informations sur la géométrie des chemins de diffusion.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour déterminer le coefficient de diffusion de différents solutés dans des milieux poreux saturés en eau comme, par exemple, celles qui sont décrites dans les travaux de Bloksma (1957), Porter *et al.* (1960), Rowell *et al.* (1967) et Lindstrom *et al.* (1968). Ces méthodes ne sont cependant pas toujours faciles à mettre en œuvre. Elles nécessitent en effet, soit la préparation d'un milieu poreux contenant le soluté étudié (avec ou sans traceur) et jouant le rôle de source, soit l'analyse de la phase liquide contenue dans le milieu étudié. La réalisation de ces opérations n'est pas toujours aisée et il peut être utile de les éviter. Dans ce but, une méthode simple de détermination du coefficient de diffusion moléculaire a été développée. Elle est présentée dans ce mémoire avec deux exemples d'application. L'un concerne la diffusion de ^{36}Cl et ^{3}H dans différents types de milieux poreux, l'autre se rapporte à l'évaluation du coefficient de diffusion de plusieurs herbicides en solution dans l'eau.

I. — Méthode

1. — *Principe de la détermination du coefficient de diffusion moléculaire*

1.1. — *Solution de l'équation de diffusion.*

Soit un milieu poreux d'épaisseur 2 l au contact d'une solution bien agitée et de volume fini. Cette situation peut être représentée géométriquement par le schéma de la figure 1.

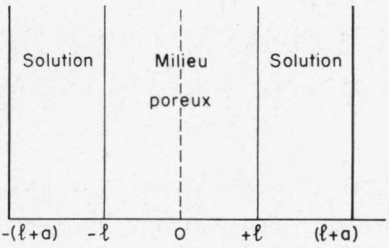


FIG. 1. — *Schéma correspondant à la cellule de mesure* (milieu poreux fini, solution agitée de volume fini).

A schematic diagram of the diffusion cell (finite porous medium, stirred solution of limited volume).

Pour un déplacement s'effectuant suivant l'axe des x avec un coefficient de diffusion constant, l'équation de diffusion s'écrit :

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2}. \qquad (1)$$

Elle doit être résolue pour les conditions suivantes :

$$t = 0 \qquad C_1 = 0 \qquad -l < x < +l$$

$$t > 0 \qquad a \frac{\partial C_1}{\partial t} = \pm D_m \frac{\partial C_m}{dx}, \qquad x = \pm l$$

ou

$$\frac{a}{\varepsilon} \frac{\partial C_1}{\partial t} = \pm D_m \frac{\partial C_1}{\partial x}, \qquad C_m = \varepsilon C_1$$

avec

C_1 = concentration du traceur dans la phase liquide contenue dans le milieu poreux; masse/ml de liquide.
C_m = concentration du traceur dans le milieu poreux ; masse/ml de milieu poreux.
ε = porosité.
D_m = coefficient apparent de diffusion moléculaire dans le milieu poreux.
a = épaisseur de la couche liquide.

La solution de l'équation (1), $C_1(x, t)$, permet de calculer la quantité M(t) de traceur qui a diffusé pendant un temps t à travers une surface de 1 cm² (Crank, 1964) :

$$M(t) = \int_0^\infty C_1(x, t)\, dx = M_\infty \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1 + \alpha + \alpha^2 q_n^2} \exp\left(-\frac{D_m q_n^2 t}{l^2}\right)\right]$$

où M_∞ : quantité de traceur susceptible de diffuser pendant un temps infini

q_n : solutions de l'équation

$$\operatorname{tg} q_n = -\alpha q_n \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{a}{\varepsilon l}.$$

Ce développement n'est valable en toute rigueur que pour un coefficient de diffusion constant ; cette condition est parfaitement réalisée dans un système isotherme où il n'existe pas de gradient de concentration et où la solution ne diffère de la phase liquide contenue dans le milieu poreux que par la présence d'atomes, de molécules ou d'ions radioactifs. Le coefficient de diffusion déterminé pour un tel système est appelé *coefficient d'autodiffusion*. D'une façon générale, le coefficient de diffusion d'un soluté dépend de sa concentration dans le milieu étudié et est donc variable quand il existe un gradient de concentration. Cependant quand celui-ci est très faible (concentration de la solution inférieure à 10^{-4} mole/l), ses effets peuvent être négligés, et l'on peut alors traiter le coefficient de diffusion comme une constante (Calvet, 1976).

1.2. — *Calcul du coefficient de diffusion.*

Pour des valeurs de α et de l données, il existe une seule fonction

$$\frac{M(t)}{M_\infty} = f(D_m t). \qquad (2)$$

L'allure de cette fonction est représentée sur la figure 2. La valeur du rapport $M(t)/M_\infty$ est déterminée expérimentalement et l'utilisation de la fonction (2) permet d'obtenir le produit $D_m t$, d'où la valeur de D_m. Nous avons établi des tables de valeurs donnant $D_m t$ en fonction de $M(t)/M_\infty$ pour différentes valeurs de α et l [1].

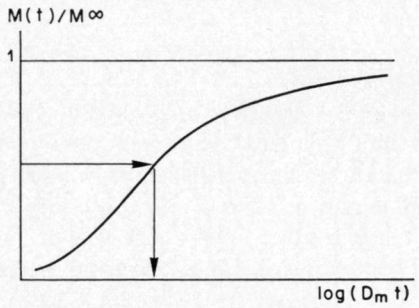


FIG. 2. — *Allure de la variation du rapport* $M(t)/M_\infty$ *en fonction de* log $(D_m t)$
$M(t)/M_\infty$ *as a function of* log $(D_m t)$.

[1] Le programme de calcul, écrit en fortran IV, peut être obtenu en s'adressant à l'un des co-auteurs.

La détermination de D_m se fait donc à partir

— des caractéristiques géométriques du dispositif de mesure (a et l),
— de la porosité du milieu poreux, ε,
— du rapport $M(t)/M_\infty$.

2. — *Réalisation des mesures*

2.1. — *Dispositif expérimental.*

La figure 3 représente la cellule de mesure. Compte tenu des propriétés de symétrie du système représenté dans la figure 1, la fonction (2) peut également être utilisée pour déterminer le coefficient de diffusion D_m d'un soluté présent dans la solution.

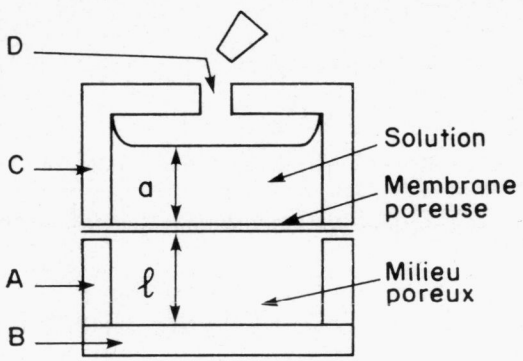


FIG. 3. — *Cellule de mesure en coupe longitudinale. Diffusion cell* (side view).

La mesure de diffusion peut être réalisée

— soit sur un matériau hydraté placé dans l'anneau A ;
— soit sur un matériau ayant subi une histoire hydrique donnée ; dans ce cas, l'anneau A rempli par le milieu poreux est placé sur une plaque poreuse et des traitements de déshydratation et d'hydratation sont effectués.

Quand le milieu poreux est prêt, l'anneau A est collé au disque B et à l'anneau C pour reconstituer la cellule de mesure.

L'agitation est obtenue par un agitateur oscillant. Elle doit être suffisante pour que la phase liquide contenue dans l'anneau C soit toujours homogène. Elle ne doit cependant pas être trop violente pour ne pas perturber les milieux non consolidés.

Il est toutefois préférable que les milieux non consolidés soient séparés de la solution par une membrane poreuse pour éviter la dispersion des particules fines éventuellement présentes. Les conditions suivantes doivent être remplies :

— la membrane ne doit pas adsorber le soluté étudié,
— son épaisseur doit être faible et sa porosité la plus grande possible pour ne pas modifier les coefficients de diffusion.

Les membranes millipores en polyvinyl conviennent très bien pour des traceurs du type ^{36}Cl et ^{3}H.

Le mode opératoire est très simple :

— le milieu poreux saturé en eau est placé dans l'anneau A (avec ou sans histoire hydrique),

— la membrane poreuse est mise au contact du milieu poreux. Il faut veiller à ne pas piéger d'air sous la membrane, ce qui aurait pour effet de diminuer la surface de contact entre la solution et le milieu,

— l'anneau A est scellé à l'anneau C et la solution de traceur est introduite par l'orifice D. Celui-ci est obturé pendant la durée de la mesure. Après le temps de diffusion désiré, la solution est analysée, et on en déduit M(t).

Les mesures sont faites à température constante, 25 °C dans le cas présent.

2.2. — *Précision de la méthode.*

La mesure du coefficient apparent de diffusion moléculaire dans un milieu poreux est entachée de deux types d'erreurs :

— des erreurs inhérentes à la méthode,

— des erreurs provenant de la fabrication des milieux poreux.

L'évaluation des erreurs du premier type a été faite en faisant diffuser du ^{36}Cl dans des massifs de gélose. Il est ainsi possible de travailler sur des milieux dont la structure est reproductible, ce qui permet d'éliminer les erreurs du deuxième type. Les effets de la membrane poreuse et de l'agitation ont également été déterminés dans ces conditions. Le tableau 1 donne les résultats obtenus avec un gel à 2 p. 100 d'agar-agar et une membrane en polyvinyl possédant des pores de 0,1 μ.

TABLEAU 1

Coefficient de diffusion de ^{36}Cl dans la gélose

Diffusion coefficient of ^{36}Cl in agar-agar

Situations étudiées	Nombre de mesures	$D_m \times 10^6$ $cm^2\ s^{-1}$
Sans membrane, sans agitation.....	14	7,90 $\pm$ 0,26
Avec membrane, sans agitation	15	8,09 $\pm$ 0,30
Avec membrane, avec agitation	15	9,54 $\pm$ 0,35

L'intervalle de confiance des valeurs du coefficient de diffusion correspond au seuil de probabilité 0,05. Les conclusions suivantes peuvent être formulées :

— la membrane poreuse n'affecte pas significativement la valeur du coefficient de diffusion,

— l'agitation entraîne une augmentation significative du coefficient de diffusion,

— l'erreur due à la méthode est de $\pm$ 4 p. 100. Cette valeur doit donc être considérée comme la plus petite possible.

Enfin, il faut également signaler que l'étude de la fonction (2) montre qu'il est préférable d'utiliser des temps de diffusion tels que :

$$0{,}1 < \frac{M(t)}{M_\infty} < 0{,}7.$$

En dehors de ce domaine, l'erreur sur D_m s'accroît considérablement.

II. — Exemples d'application

La méthode précédemment décrite a été appliquée, d'une part à la diffusion de traceurs dans des milieux poreux non consolidés, d'autre part à la détermination du coefficient de diffusion moléculaire de plusieurs herbicides en solution aqueuse.

1. — *Diffusion de ^{36}Cl et ^{3}H dans des milieux poreux non consolidés*

1.1. — *Nature et caractéristiques des milieux poreux étudiés.*

Les milieux étudiés présentent soit une distribution de tailles de pores unimodale, soit une distribution bimodale. Les premiers sont constitués par des sables siliceux plus ou moins broyés et les seconds par des grains de pierre ponce. Leurs caractéristiques granulométriques sont données dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Caractéristiques granulométriques des milieux étudiés

MP : sables siliceux
PP : pierre ponce

Particle size distribution of porous media

MP : quartz sand
PP : pumice-stone

	2 μ %	2-20 μ %	20-50 μ %	50-100 μ %	100-200 μ %
MP 1	5	20	55	15	5
MP 2	5	15	30	45	5
MP 3	5	5	15	25	50
MP 4	10	15	30	40	5

MP 5 0-5 μ
MP 6 5-20 μ
MP 7 20-50 μ
MP 8 50-100 μ
MP 9 100-200 μ

PP 1 1 00-200 μ
PP 2 1 000-1 250 μ

Les traceurs sont contenus dans une solution de chlorure de calcium N/100 et la même solution sans traceur est utilisée pour saturer les milieux poreux. Les milieux sont préparés de la façon suivante :

— Pour les sables MP 1 à MP 7, l'anneau A est rempli par une pâte saturée qui est ensuite déshydratée puis réhydratée sous le vide de la trompe à eau.

— Les sables MP 8 à MP 9 et la pierre ponce sont saturés sous vide puis placés dans l'anneau A.

1.2. — *Résultats.*

Tous les résultats sont donnés avec un domaine de confiance correspondant au seuil de probabilité 0,05 (tabl. 3).

TABLEAU 3

Coefficients de diffusion moléculaire de ^{36}Cl et ^{3}H dans différents milieux poreux

Diffusion coefficients of ^{36}Cl and ^{3}H in different porous media

Milieu	Porosité	^{36}Cl		^{3}H	
		Nombre de mesures	$D_m \times 10^5$ $cm^2\ s^{-1}$	Nombre de mesures	$D_m \times 10^5$ $cm^2\ s^{-1}$
MP 1	0,38	4	0,82 ± 0,18	4	1,5 ± 0,20
MP 2	0,33	8	0,78 ± 0,17	8	1,06 ± 0,28
MP 3	0,36	8	0,39 ± 0,08	8	1,26 ± 0,22
MP 4	0,34	9	0,86 ± 0,09	9	1,40 ± 0,20
MP 5	0,44	10	1,01 ± 0,08	10	1,76 ± 0,15
MP 6	0,46	10	1,23 ± 0,09	10	1,30 ± 0,20
MP 7	0,43	6	1,39 ± 0,23	6	1,38 ± 0,22
MP 8	0,42	10	1,24 ± 0,12	10	1,68 ± 0,10
MP 9	0,40	10	1,11 ± 0,13	10	1,76 ± 0,30
PP 1	0,77	7	0,14 ± 0,02	7	0,88 ± 0,15
PP 2	0,78	8	0,69 ± 0,01	10	0,85 ± 0,04

Les erreurs sur D_m sont supérieures à celle qui avait été déterminée pour la méthode seule. Ceci est dû aux variations des caractéristiques géométriques de l'espace poral qui proviennent de la fabrication des milieux poreux.

1.3. — *Discussion.*

La comparaison des valeurs de D_m entre elles ne permet d'apprécier que l'importance relative du transport de masse d'un soluté dans plusieurs milieux. Il est cependant intéressant d'utiliser les mesures de diffusion moléculaire pour obtenir des informations sur les propriétés de l'espace poral des milieux poreux. Pour cela, le coefficient D_m est comparé au coefficient de diffusion moléculaire en phase liquide. On définit ainsi un coefficient de transfert :

$$\gamma_m = \frac{D_m}{D_0}$$

γ_m n'est en fait utile que pour la comparaison de milieux possédant des porosités égales. Dans le cas général où les porosités des milieux comparés sont différentes, il est préférable d'utiliser le coefficient apparent de diffusion dans les pores :

$$D_p = \varepsilon D_m.$$

Dans ces conditions, γ_m est remplacé par le coefficient de transfert dans les pores, γ_p :

$$\gamma_p = \frac{D_p}{D_0}.$$

a) *Le coefficient de transfert considéré comme une caractéristique du milieu poreux.*

Il est admis par certains auteurs que la grandeur τ définie par

$$\tau = \frac{1}{\gamma_p}$$

représente la tortuosité des milieux poreux (Penman, 1940 ; Klinkenberg, 1951 ; Jackson *et al.*, 1963 ; Legoff et Prost, 1965).

Rappelons que la tortuosité est définie par le rapport :

$$\frac{\text{longueur des chemins réellement parcourus}}{\text{longueur du milieu poreux}} = \tau.$$

La définition de τ suppose que la fraction de l'aire occupée par les pores dans une section plane du milieu poreux soit égale à la porosité (théorème de Dupuit). Cela implique que la distribution de la phase liquide dans le milieu poreux soit homogène et isotrope.

TABLEAU 4

Valeurs du paramètre $\tau = 1/\gamma_p$
Values of the parameter $\tau = 1/\gamma_p$

Milieu	^{36}Cl $\tau = 1/\gamma_p$	^{3}H $\tau = 1/\gamma_p$
MP 1	6,3 ± 0,7	4,4 ± 0,7
MP 2	7,1 ± 1,7	7,1 ± 2,0
MP 3	12,5 ± 3,0	5,3 ± 1,0
MP 4	6,7 ± 0,7	5,3 ± 0,9
MP 5	4,2 ± 0,4	3,1 ± 0,3
MP 6	3,3 ± 0,3	4,2 ± 0,7
MP 7	3,1 ± 0,60	4,0 ± 1,0
MP 8	3,6 ± 0,40	3,5 ± 0,4
MP 9	4,2 ± 0,40	3,1 ± 0,6
PP 1	16,7 ± 2,7	3,6 ± 0,6
PP 2	3,5 ± 0,10	3,7 ± 0,3

Les valeurs de τ correspondant aux mesures sont données dans le tableau 4. Elles ont été obtenues à partir des valeurs de D_0 suivantes :

^{36}Cl : $D_0 = 1{,}85.10^{-5}$ cm^2 s^{-1} (Porter *et al.*, 1960)
^{3}H : $D_0 = 2{,}44.10^{-5}$ cm^2 s^{-1} (Wang, *in* Eisenberg et Kauzmann, 1969).

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire la relation entre la tortuosité et la porosité d'un milieu poreux. Parmi ceux-ci, deux sont particulièrement simples:

— le premier assimile l'espace poral à un réseau isotrope de pores. Legoff et Prost (1965) ont établi la relation $\tau = f(\varepsilon)$ valable dans ce cas ;

— le second schématise le milieu à l'aide d'un empilement de sphères et conduit à $\tau = \sqrt{2}/\varepsilon$ (Penman, 1940).

Les relations correspondant à ces deux modèles sont représentées dans la figure 4 sous la forme $1/\tau = \gamma_p = f(\varepsilon)$. Les valeurs correspondant aux résultats des mesures

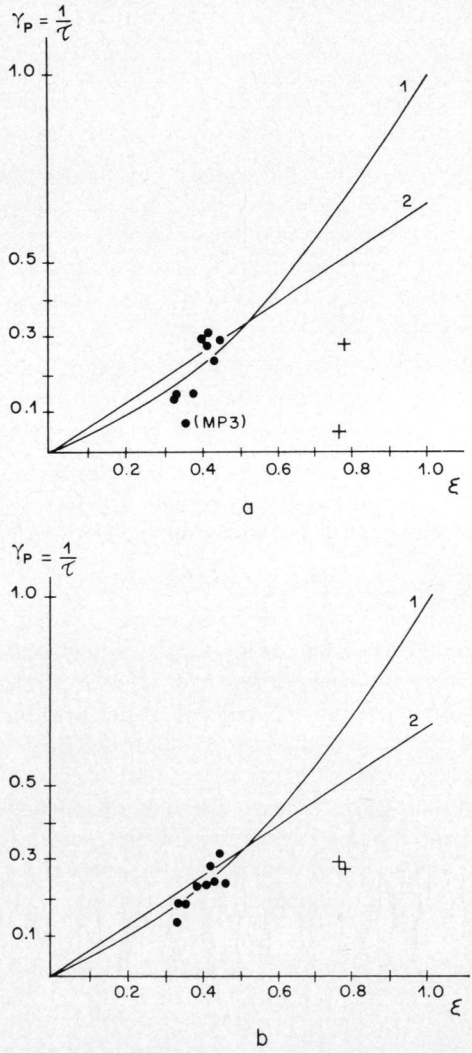


FIG. 4. — *Variation du coefficient de transfert dans les pores en fonction de la porosité. a)* ^{36}Cl, *b)* ^{3}H.

Les paramètres 1 et 2 correspondent aux modèles de Legoff et Prost d'une part, et Penman d'autre part : ● sables siliceux ; + grains de pierre ponce.

Graph of $\gamma_p = D_p/D_0$ *versus porosity,* ε. *a)* ^{36}Cl ; *b)* ^{3}H. Numbers 1 and 2 on the curves refer to the models of Legoff and Prost, and Penman, respectively : ● quartz sands ; + pumice particles.

sont également portées sur le graphique. Un grand nombre d'entre elles sont assez voisines de la courbe relative au modèle 1. Certaines s'en écartent cependant ; ce sont celles qui se rapportent à ^{36}Cl pour le milieu MP 3, et à ^{3}H et ^{36}Cl pour les empilements de pierre ponce.

b) *Le coefficient de transfert considéré comme une caractéristique d'un système soluté-milieu poreux.*

L'analyse précédente s'avère insuffisante dans un certain nombre de cas. Il apparaît en effet que la valeur de τ dépend de la nature du traceur, comme le montrent les observations suivantes :

— Empilement de grains de pierre ponce : $\gamma_p(^{36}Cl)$ dépend de la taille des grains mais $\gamma_p(^{3}H)$ n'en dépend pas et a une valeur voisine de celle des sables, donc :

• $\gamma_p(^{36}Cl)$ dépend de la nature bimodale de la distribution des pores quand les grains sont petits. Des mesures faites avec une molécule organique (l'atrazine) ont montré que la tortuosité des chemins de diffusion dans la pierre ponce était très grande (Calvet *et al.*, 1978). On peut en déduire que les mouvements du chlore sont très certainement limités dans ce matériau et cela, d'autant plus que l'aire de l'interface grain-solution intergrain est grande.

• $\gamma_p(^{3}H)$ n'est pas modifié par les grains de pierre ponce, c'est-à-dire par la présence de pores de petites dimensions (80 p. 100 du volume des grains correspond à des pores inférieurs à 1,4 μ).

— Empilements de sables siliceux. Avec les particules les plus petites (milieu MP 1), les comportements des deux traceurs deviennent opposés. $\gamma_p(^{36}Cl)$ tend à devenir plus petit et $\gamma_p(^{3}H)$ à devenir plus grand en comparaison avec les valeurs relatives aux autres milieux.

Ces observations peuvent s'expliquer si on admet que les mouvements du tritium dans les pores de petite taille ne sont pas limités par la tortuosité qui peut être élevée dans ce cas. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que la phase liquide contenue dans ces pores permette un transfert des molécules d'eau et des protons plus rapide que dans l'eau libre. Cette phase doit pour cela posséder des propriétés physico-chimiques particulières, ce qui est vraisemblable d'après les résultats de mesure des propriétés diélectriques effectuées sur des empilements hydratés de particules de carborundum ; ces résultats montrent en effet que l'arrangement des molécules d'eau doit être différent dans les pores de petites dimensions (avec des particules < 10 μ), de ce qu'il est dans l'eau libre (Mamy [1], communication personnelle).

2. — *Mesure du coefficient de diffusion de molécules herbicides en solution aqueuse*

Le principe de cette mesure est très simple. Etant donné un milieu poreux consolidé pour lequel le coefficient de transfert est connu, la détermination du coefficient apparent de diffusion D_m d'un composé permet de calculer son coefficient de diffusion moléculaire dans la phase liquide :

---

[1] I.N.R.A. Station de Science du Sol, route de St-Cyr, 78000 Versailles.

Cette méthode est utilisable si les conditions suivantes sont remplies :

— la géométrie de l'espace poral du milieu poreux doit être constante, ceci impose donc l'utilisation d'un milieu consolidé ;

— la taille des pores du milieu poreux doit être assez grande ($> 10\ \mu$) ;

— le fluide et le soluté ne doivent pas altérer le milieu poreux ;

— les solutés utilisés ne doivent pas être adsorbés par la phase solide du milieu poreux.

Les coefficients de diffusion de plusieurs herbicides ont ainsi été déterminés en utilisant des plaques de verre fritté comme milieu poreux. Le coefficient de transfert a été déterminé avec l'atrazine dont le coefficient de diffusion moléculaire dans l'eau est égal à 6.10^{-6} cm^2 s^{-1} (Calvet, 1976). La concentration de la solution mise en contact avec le verre fritté est comprise entre 5 et 10 μg/ml ($< 10^{-4}$ mole/l) selon les composés étudiés. Toutes les analyses ont été réalisées par spectrométrie d'absorption dans l'ultra-violet. Le tableau 5 donne les résultats trouvés.

TABLEAU 5

Coefficient de diffusion moléculaire de composés herbicides en solution aqueuse

Diffusion coefficient for some herbicides in aqueous solution

Référence	D (atrazine) = $0{,}6.10^{-6}$ cm^2 s^{-1}
Terbutryne	$D = (11{,}0 \pm 1{,}8).10^{-6}$ cm^2 s^{-1}
Métoxuron	$D = (6{,}3 \pm 0{,}9).10^{-6}$ cm^2 s^{-1}
Isoproturon	$D = (8{,}5 \pm 1{,}8).10^{-6}$ cm^2 s^{-1}
Métabenzthiazuron	$D = (7{,}0 \pm 1{,}5).10^{-6}$ cm^2 s^{-1}
Pyrazone	$D = (5{,}9 \pm 1{,}5).10^{-6}$ cm^2 s^{-1}

Cette méthode de mesure est très commode ; la détermination du coefficient de diffusion moléculaire dans un liquide est en effet souvent très délicate à réaliser car il faut établir un contact entre deux milieux liquides sans mélange mécanique ; ici cet inconvénient est supprimé.

III. — Conclusion

La méthode proposée s'avère d'une mise en œuvre très simple. Elle peut être utilisée avec des solutions de traceurs radioactifs ou avec des solutions très diluées. Sa précision intrinsèque est bonne, mais la précision avec laquelle un coefficient de diffusion dans un milieu poreux est déterminé est essentiellement fixée par la fabrication du milieu.

Les mesures présentées dans ce mémoire permettent d'attirer l'attention sur la signification du coefficient de transfert $\gamma_p = D_p/D_0$. Il est possible de l'assimiler à l'inverse de la tortuosité dans les milieux constitués par des empilements de particules de type limons ou sables ; dans ce cas, la relation entre la tortuosité et la porosité donnée par le modèle du réseau isotrope de pores peut être utilisée pour prévoir le coefficient de diffusion de traceurs tels que ^{36}Cl et ^{3}H. Dans les autres milieux, le coeffi-

cient de transfert a une signification plus complexe. Il exprime globalement les effets combinés de la géométrie des chemins de diffusion et des propriétés physico-chimiques de la phase liquide. Dans ces conditions, il dépend de la nature du traceur et caractérise un système soluté-milieu. Cette conclusion est importante et n'avait été donnée que pour des situations où le soluté était adsorbé.

Il faut enfin remarquer que la relation entre le coefficient de transfert et la nature de la distribution de la taille des pores dépend du traceur utilisé et de la dimension des grains poreux.

Il en résulte que toute prévision d'un phénomène de diffusion à partir d'informations sur la géométrie de l'espace poral n'est généralement pas possible.

Ces conclusions sont évidemment partielles et une étude plus approfondie serait nécessaire pour décrire plus précisément les relations entre les phénomènes de diffusion et les propriétés des milieux poreux. Une telle description n'entrait pas dans l'objectif de ce mémoire qui était surtout de présenter une méthode de mesure du coefficient de diffusion moléculaire et d'en exposer quelques applications.

Reçu pour publication en juillet 1979.

Summary

The measurement of diffusion coefficients of solutes in porous media saturated with water

A method is proposed to measure the coefficient of molecular diffusion of a solute in a porous medium, saturated with water ; the coefficient is calculated from the amount of solute which enters a finite porous medium, from a stirred solution of finite volume. The accuracy of the method is within about 4 p. 100.

Two examples of application are presented :

— The diffusion coefficients of ^{36}Cl and ^{3}H in unconsolidated porous media (quartz sand and pumice stone) have been measured ; an attempt has been made to relate them to some properties of the porous space of these media ; experimental results show that the ratio between diffusion coefficient in a porous medium and in aqueous solution is not only dependent on the geometry of the porous space.

— A simple method for measuring diffusion coefficient of some herbicides in aqueous solution is proposed.

Zusammenfassung

Über die Bestimmung des molekularen Diffusionskoeffizienten von Auflösungen in porösen, durch wasser gesättigte medien

Diese Abhandlung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung des molekularen Diffusionskoeffizienten einer Lösung in einem, durch Wasser gesättigtem, porösen Medium, welches mit einer durchgerührten Lösung endlichen Volumens in Berührung gebracht wird. Die vershiedenen experimentalen Stadien werden beschrieben und die Genauigkeit des Verfahrens abgeschätzt.

Die Diffusionskoeffizienten von ^{36}GL und ^{3}H werden in einem porösen unverfestigten Medium (zerkleinerter Sand und Bimsstein) gemessen. Man versucht, daraus Aussagen über die Eigenschaften des poralen Raumes des untersuchten Mediums abzuleiten.

Es wird besonders veranschaulicht, dass die Beziehung $\frac{Do}{Dp}$ zwischen dem molekularen Diffusionskoeffizienten in Flüssigphase und dem scheinbaren Diffusionskoeffizienten in den Poren nicht stets dem Krümmungsbestand des porösen Mediums assimiliert werden darf.

Ein einfaches Verfahren zur Abschätzung des Diffusionskoeffizienten verschiedener Unkrautvertilgungsmittel in wässeriger Lösung wird vorgeschlagen.

РЕЗЮМЕ

Определение коэффициента молекулярной диффузии растворов веществ в пористой насыщенной влагой среде.

АГНЕССА ХЮБЕР, КАЛЬВЕ Р.

В данной работе представлен метод определения коэффициента молекулярной диффузии растворов веществ в пористой, насыщенной влагой среде, при введении этой последней в контакт с конечным об'емом встряхиваемого раствора. Описываются различные фазы эксперимента и оценивается точность метода. Затем, приводятся два примера применения :

Измеряются коэффициенты диффузии Cl^{36} и H^3 в пористых непрочных средах (молотые пески и пемза) ; делается попытка получения информации о свойствах пространства пор изучавшихся сред ; доказывается, в частности, что соотношение D_0/D_p между коэффициентом молекулярной диффузии в жидкой фазе и видимым коэффициентом диффузии в порах, не всегда приравнивается к извилистости пористой среды.

Предлагается простой метод определения коэффициента диффузии нескольких гербицидов в водном растворе.

Références bibliographiques

BLOKSMA A. H., 1957. The diffusion of sodium and iodide ions and of urea in clay pastes. *J. Colloid Sci.*, **12,** 40-52.

CALVET R., 1976. Mesure rapide du coefficient de diffusion de l'atrazine en solution aqueuse. *Weed Research*, **16,** 53-55.

CALVET R., LE RENARD J., TOURNIER C., HUBERT A., 1978. Hydrodynamic dispersion in columns of pumice particles. *J. Soil Sci.*, **29,** 463-474.

CRANK J., 1964. *Mathematics of diffusion.* Clarendon Press Oxford, 347 p.

EISENBERG D., KAUZMANN W., 1969. *The structure and properties of water.* Oxford and the Clarendon Press, 296 p.

KLINKENBERG L. J., 1951. Analogy between diffusion and electrical conductivity in porous rocks. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **62,** 559-564.

LE GOFF P., PROST C., 1966. Interprétation de la conductivité et de la diffusivité apparente des milieux poreux et dispersés à l'aide de modèles géométriques à cellules cubiques. *Génie chimique* **95** (1), 1-25.

LINDSTROM F. T., BOERSMA L., GARDNER H., 1968. 2,4-D diffusion in saturated soils : a mathematical theory. *Soil Sci.*, **106** (2), 107-113.

PENMAN H. L., 1940. Gas and vapor movements in the soil. I. The diffusion of vapour through porous solids. *J. Agric. Sci.*, **30,** 437-462.

PORTER L. K., KEMPER W. D., JACKSON R. D., STEWART B. A., 1960. Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24,** 460-463.

ROWELL D. L., MARTIN M. W., NYE P. H., 1967. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. III. The effect of moisture content and soil solution concentration on the self-diffusion of ions in soils. *J. Soil Sci.*, **18** (2), 204-222.

ANNALES AGRONOMIQUES

VOL. 30 N° 3 1979

Nom de l'emprunteur	Emprunté le	Remis le
VACHIER. P.	22/10/2010	22/10/2010

Ann. agron., 1979, **30** (3), 247-263.

Structure d'un milieu poreux : la craie

P. VACHIER (1), P. CAMBIER (2) et R. PROST (2)

avec la collaboration technique de J. DRIARD (2)

(1) *Station de Science du Sol*, I.N.R.A.,
Route de Montmirail Fagnières, 51000 *Châlons-sur-Marne*

(2) *Station de Science du Sol*,
Centre national de Recherches agronomiques, *I.N.R.A.*,
78000 *Versailles*

Résumé

L'étude des caractéristiques porales des craies, nécessaire pour la compréhension des phénomènes de transfert d'eau et de solutés dans ces matériaux, comprend deux volets complémentaires :

1. La visualisation de l'arrangement des grains de calcite à partir de photographies prises au microscope électronique à balayage,

2. La description de l'espace poral à partir de mesures de porosité effectuées :

a) en déterminant les densités réelles et apparentes des matériaux,

b) par porosimétrie au mercure.

La détermination d'un certain nombre de paramètres structuraux du matériau nous a permis de bâtir un modèle dont la validité repose sur le bon accord entre :

a) Les données qui peuvent être calculées à partir du modèle et celles déterminées expérimentalement,

b) le mécanisme de pénétration du mercure prévu pour le modèle et celui obtenu au cours de l'expérience de porosimétrie au mercure.

La description d'un mécanisme de fonctionnement, associé à des données d'ordre structural, devrait en principe conduire à un modèle utilisable pour l'étude des propriétés hydrodynamiques des craies.

La connaissance des phénomènes de transfert d'eau et de solutés dans les craies, nécessaire pour une meilleure évaluation des potentialités agricoles des sols crayeux, mais aussi de leur aptitude à épurer les eaux usées venant en particulier des industries agro-alimentaires, nous a conduits à aborder l'étude des caractéristiques porales de trois échantillons prélevés dans la région champenoise. Cette étude comprend deux volets complémentaires. Le premier concerne la visualisation de l'arrangement des grains de calcite. Le second se rapporte à la description de l'espace poral. Il s'agit alors d'estimer le volume, la dimension et la forme des pores présents dans le milieu.

A. — Matériaux et méthodes

Les craies étudiées ont des origines géologiques différentes (tabl. 1) (ce tableau contient aussi les sigles utilisés dans le texte pour les désigner). Elles ont été prélevées à trois mètres de profondeur.

TABLEAU 1

Caractéristiques des craies étudiées

Characteristics of chalks

Origine	Age géologique	Désignation dans le texte	Rayon moyen des grains de calcite R (μm)	Pourcentage de coccolithes	Pourcentage de minéraux insolubles dans HCl
Fagnières	sénonien	S_1	0,380	30	0,62
Marson	sénonien	S_2	0,380	30	2,05
Corbeil	turonien	T	0,380	10	7,8

Les méthodes employées concernent :

1. La description de l'arrangement des grains à partir de photographies prises au microscope électronique à balayage (MEB). L'appareil utilisé est un JEOL JSM 35. L'identification de tous les constituants requiert une analyse minéralogique par diffraction des rayons X des résidus obtenus après dissolution du calcaire par l'acide chlorhydrique ;

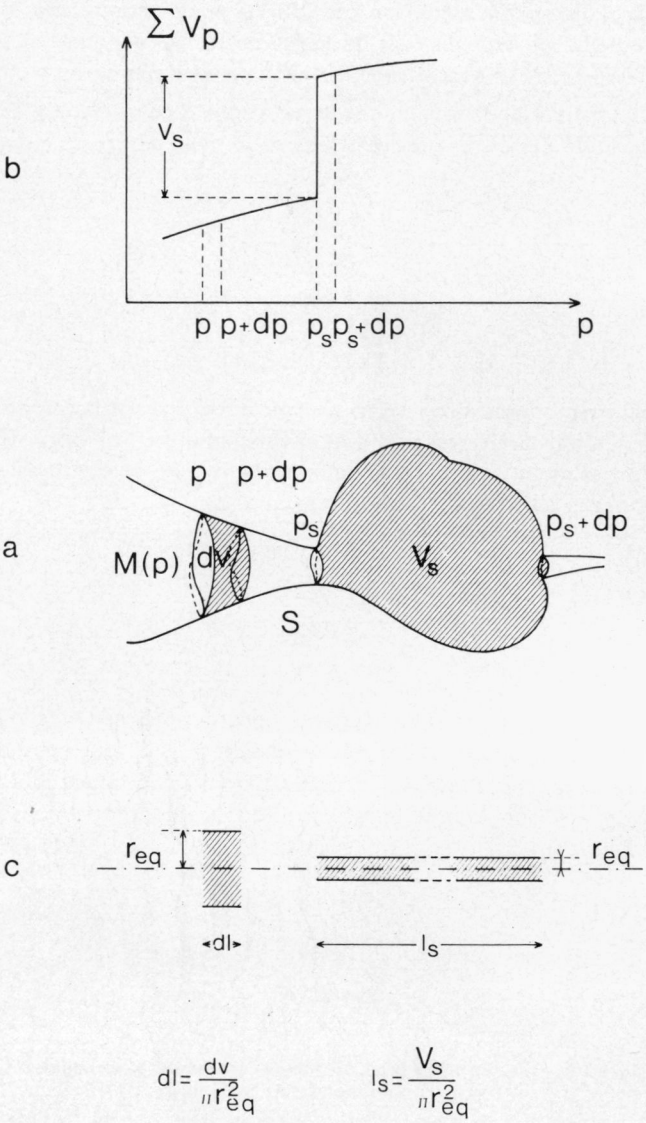
2. La description de l'espace poral qui comprend :

- la détermination de la porosité totale des échantillons par des mesures de densité apparente et réelle des matériaux ;
- l'étude des spectres de porosité des craies obtenus avec un porosimètre à mercure CARLO-ERBA 65 A. Les échantillons sont dégazés dans la cellule de l'appareil pendant 2 h sous un vide de 5.10^{-2} torr. Ils sont ensuite immergés dans le mercure sous vide dynamique. On mesure alors le volume du mercure qui pénètre dans l'échantillon en fonction de la pression exercée, entre 1 et 1 000 bars. Il existe une relation entre la taille des pores et la pression. En effet, si nous prenons le cas d'une surface solide S de nature homogène mais de forme quelconque (fig. 1) la pénétration du mercure correspond à la progression et à la déformation du ménisque de mercure M. A l'équilibre, à une pression p correspond un ménisque M(p) défini par :

a) l'équation générale de Laplace :

$$p = \nu \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \qquad (1)$$

où R_1 et R_2 sont les rayons de courbure principaux en un point de M(p) et ν la tension superficielle ;



$$dl = \frac{dv}{\pi r_{eq}^2} \qquad l_s = \frac{V_s}{\pi r_{eq}^2}$$

FIG. 1 — *Schéma illustrant le mécanisme de pénétration du mercure dans un pore quelconque* (fig. 1*a* et 1*b*) *et l'approximation faite en adoptant l'hypothèse de pores cylindriques* (fig. 1*c*).

Scheme showing the mechanism of mercury penetration in any pore (fig. 1*a* et 1*b*) *and the approximation that we do by using the hypothesis of cylindrical pores* (fig. 1*c*).

b) l'angle φ de raccordement de M(p) sur S qui est caractéristique de l'interface mercure-solide.

A l'accroissement dp de p, correspond la pénétration du volume dV de mercure, délimité par M(p), M(p + dp) et S. On voit qu'à l'échelle d'un pore, p ayant atteint

un certain seuil p_s, ce volume peut être fini, soit V_s, ce qui donne pour l'injection dans un pore, une courbe du type de celle de la figure 1*b*. A l'échelle de l'échantillon, la somme est faite de tous ces accroissements continus et discontinus.

Il n'est pas possible de trouver dans le cas de surface quelconque un paramètre caractérisant la taille des pores qui soit en relation avec p.
En effet,

$$p = \frac{2\nu}{r_h} \tag{2}$$

où

$$r_h = \left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\right]^{-1}$$

est la moyenne harmonique des rayons de courbure, qui est constante en tout point d'un ménisque. Ce paramètre est relatif au ménisque et non au pore. C'est seulement dans le cas de pores ayant une forme régulière que r_h peut être relié à leur dimension. Ainsi, pour des pores cylindriques de rayon r, on a

$$r_h = r \mid \cos \varphi \mid^{-1}$$

d'où

$$p = \frac{2\nu \mid \cos \varphi \mid}{r} \tag{3}$$

qui cette fois relie p à la géométrie du système poral lui-même. Dans le cas de système poreux quelconque, on applique encore la formule (3), ce qui conduit à définir un système de pores cylindriques équivalents, de rayon r_{eq}. La figure 1*c* illustre le caractère arbitraire de cette représentation que nous avons néanmoins utilisée.

PLANCHE I

Cliché 1. — *Photographie prise au* MEB *de l'échantillon* S_1 *de* Fagnières.
Les flèches indiquent les coccolithes.

Scanning electron microscope photography of the Fagnières *sample* S_1.
The arrows show the coccolites.

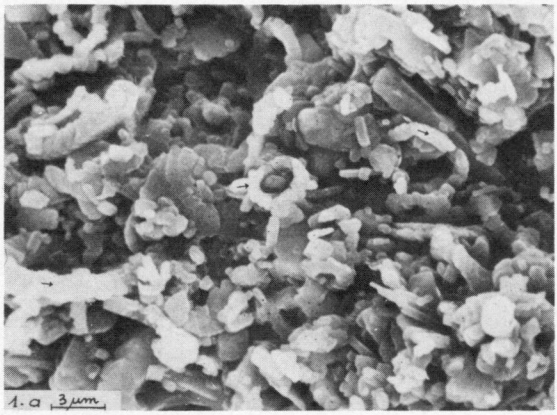
Cliché 2. — *Photographie prise au* MEB *de l'échantillon* S_2 *de* Marson.
Les flèches indiquent les coccolithes.

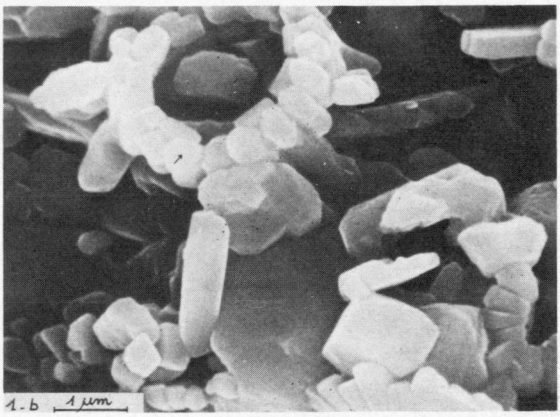
Scanning electron microscope photography of the Marson *sample* S_2.
The arrows show the coccolites.

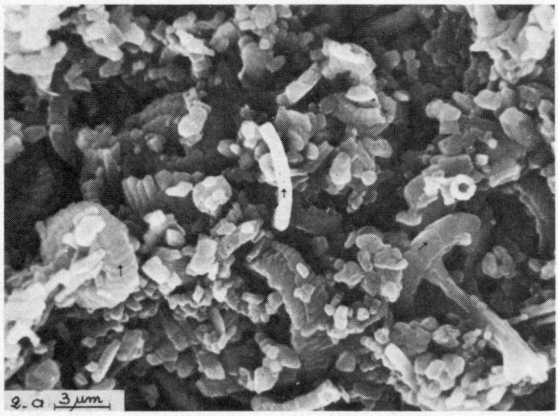
Cliché 3. — *Photographie prise au* MEB *de l'échantillon* T *de* Corbeil.
La flèche indique une papule d'argile.

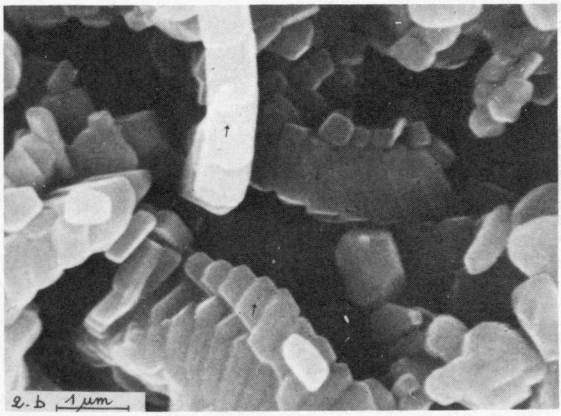
Scanning electron microscope photography of the Corbeil *sample* T.
The arrow shows a clay grain.

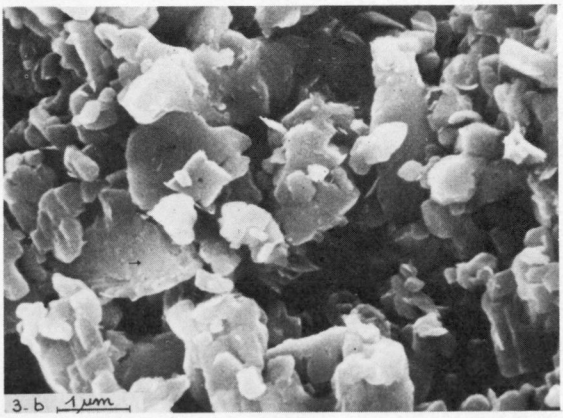
PLANCHE I











La seconde difficulté est, dans l'emploi même de la formule (3), la connaissance du facteur $\nu \mid \cos \varphi \mid$. Il varie, notamment à cause de la dépendance de φ par rapport à la nature et à l'état de la surface. Différents auteurs tentent de déterminer $\nu \mid \cos \varphi \mid$ dans chaque cas particulier (Diamond, 1971 ; Winslow, 1978...). Il ne s'est pas avéré utile d'apporter une grande précision à cette détermination. Aussi avons-nous adopté une valeur moyenne, recommandée par le constructeur et par Lawrence (1978) : avec

$$\nu = 480 \text{ mN m}^{-1}$$
$$\varphi = 141°$$
$$r_{eq} \text{ (Å)} \simeq \frac{75\,000}{P \text{ (bars)}}$$

B. — Résultats

1. — *Observations faites au MEB*

La craie est constituée par l'accumulation de thèques calcaires, d'algues unicellulaires ou de débris de ces thèques (photos 1, 2 et 3). Ils se présentent le plus souvent sous forme de coccolithes (photos 1 et 2) ou de grains séparés (photo 3). Chaque échantillon est constitué de particules ayant la forme de « grains de maïs » dont le rayon moyen mesuré sur les photographies prises au MEB est de l'ordre de 0,380 μm. Les coccolithes couvrent environ 30 p. 100 de la surface totale des photographies des échantillons S_1 et S_2 (photos 1 et 2) et seulement 10 p. 100 dans le cas de la craie T (photo 3). La craie T se distingue des deux précédentes par son aspect plus détritique, mais aussi par la présence de papules argileuses (photo 3).

2. — *Résidus insolubles de la craie*

L'importance et la nature des résidus obtenus après dissolution du calcaire par l'acide chlorhydrique varient selon les échantillons (tabl. 1). La craie S_1 contient 0,62 p. 100 de minéraux insolubles constitués de quartz et de feldspath. La craie S_2 contient 2,05 p. 100 de matériaux insolubles constitués en majeure partie d'illite et de kaolinite, et la craie T, 7,8 p. 100 de ces mêmes minéraux. On remarque sur la photo 3 que la taille des papules d'argile est du même ordre de grandeur que celle des grains de calcite.

3. — *La porosité*

La porosité totale P des échantillons calculée à partir des densités est beaucoup plus faible pour la craie T ($P = 0{,}26$) que pour les craies S_1 et S_2 ($P = 0{,}42$).

4. — *La porosimétrie à mercure*

La concordance des porosités déterminées à partir des mesures de densité et de porosimétrie à mercure (tabl. 2) indique que le volume des pores qui ont un rayon équivalent inférieur à 75 Å ou supérieur à 75 000 Å est négligeable. Ce volume correspond en effet à la fraction du volume des vides qui est accessible au mercure pour une pression inférieure à la pression atmosphérique et qui n'est pas occupé par le mercure aux pressions supérieures à 1 000 bars.

TABLEAU 2

Densité et porosité des échantillons

Density and porosity of the samples

Echantillons	Densité réelle d_r	Densité apparente d_a	Porosité calculée à partir des densités P	Porosité déterminée par porosimétrie P	Rayon équivalent correspondant au maximum du spectre de porosité r^0_{eq} (µm)
S_1	2,70	1,58	0,42	0,42	0,39
S_2	2,71	1,55	0,43	0,41	0,39
T	2,66	1,97	0,26	0,26	0,186

Les courbes représentant le volume cumulé de mercure qui pénètre dans l'échantillon en fonction du rayon r_{eq} sont caractérisées par un coude très net indiquant une entrée brutale du mercure qui se poursuit ensuite de manière plus progressive (fig. 2). Tallon (1978) présente le même type de courbes pour d'autres échantillons de craie.

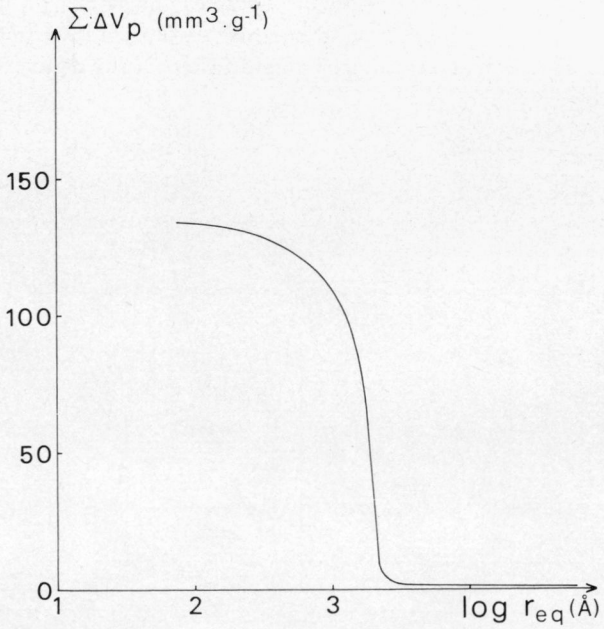


FIG. 2. — *Courbe représentant le volume cumulé de mercure qui pénètre dans l'échantillon* T *de Corbeil en fonction du logarithme du rayon équivalent des pores.*

Curve showing the cumulated volume of mercury which enters into the Corbeil *sample* T *versus the logarithm of the equivalent pore radius.*

La courbe de répartition du volume poral en fonction des rayons r_{eq} ou spectre de porosité des trois échantillons étudiés sont unimodaux (fig. 3). Ceux des craies S_1 et S_2 se recouvrent, celui de la craie T est décalé vers les valeurs de r_{eq} plus faibles.

On caractérise finalement le système poral de chaque échantillon par sa porosité totale P déterminée au mercure et par la valeur r^0_{eq}, abscisse du maximum du spectre de porosité (tabl. 2).

La craie T présente des caractéristiques porales ($P = 0{,}26$; $r^0_{eq} = 0{,}186$ μm) nettement différentes des craies S_1 et S_2 ($P = 0{,}42$; $r^0_{eq} = 0{,}39$ μm).

C. — Interprétation des résultats

Les résultats obtenus soulèvent la question suivante : la différence de porosité observée entre les craies S et T résulte-t-elle de la présence d'impuretés ou d'un arrangement particulier des grains de calcite ?

Partant de la craie S_1 qui contient peu d'impuretés (0,62 p. 100), on calcule la fraction de la porosité qui serait occupée sans modifier l'arrangement des grains de calcite par l'apport d'une plus grande quantité d'impuretés (8 p. 100). Il faut pour cela connaître la localisation et le volume occupé par la fraction argileuse. 1 cm³ d'échantillon S_1, soit 1,58 g de craie, contient $0{,}08 \times 1{,}58 = 0{,}126$ g d'argile. En supposant que la densité de l'argile soit 2,6, sa phase solide occupe un volume de 0,05 cm³ ; dans l'hypothèse d'un remplissage par l'argile des volumes vides entre les grains de calcite, on devrait observer une diminution de la porosité de 0,05. Cette diminution n'est pas suffisante ($0{,}42 - 0{,}05 = 0{,}37$) pour rendre compte de la porosité de la craie T ($P = 0{,}26$).

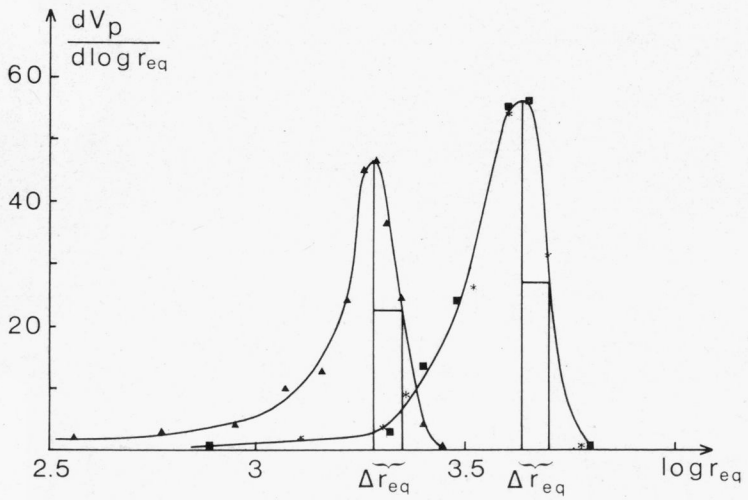


FIG. 3. — *Spectre de porosité des trois craies étudiées :* * S_1, ■ S_2 *et* ▲ T

Porosity spectra of the three chalks studied.

L'hypothèse plus plausible, compte tenu des observations faites au MEB (photo 3), d'une substitution des grains de calcite par des grains d'argile de même taille, entraîne une augmentation de la porosité de 0,03, en admettant une porosité de 0,4 pour cette argile. Cette variation va à l'encontre des résultats obtenus.

Aucune des deux hypothèses faisant intervenir l'argile pour expliquer l'écart observé entre les porosités des craies S et T n'étant satisfaisante, ce dernier doit être, par conséquent, attribué à un arrangement différent des grains de calcite.

D'une manière générale, les spectres de porosité (fig. 3) présentent une dissymétrie avec un pied de bande du côté des petits pores, qui subsiste si l'on quitte la représentation semi-logarithmique. Leur demi-largeur à mi-hauteur, mesurée du côté des grands pores est environ $\Delta r_{eq} \approx 200$ Å. Cette partie des courbes correspondant à une entrée brutale du mercure à partir d'une pression déterminée résulte du phénomène du passage discontinu de seuils ou constrictions caractérisées par la valeur moyenne r^0_{eq} et la dispersion Δr_{eq}. Le pied de bande vers les petits pores correspond à une pénétration continue du mercure aux fortes pressions. Compte tenu de la relation entre le rayon des grains de calcite et r^0_{eq}, et de la forme quasi sphérique de ces grains de calcite, les seuils doivent être circonscrits par l'empilement de quelques grains et la pénétration continue se faire dans les dièdres curvilignes délimités par 2 grains en contact (« pores en coin »).

Pour expliquer les différences observées entre les échantillons S et T, il faut imaginer des empilements différents de grains de calcite de même taille. L'échantillon T correspond à un empilement plus compact que celui de S_1 et S_2. Cette hypothèse est confortée par un aspect plus détritique.

Dans le cas des deux craies S_1 et S_2, la présence d'un plus grand nombre de coccolithes confère une structure différente au matériau. Ce dernier serait constitué par l'empilement de coccolithes dont le diamètre vaut quatre fois l'épaisseur. Ces derniers ménagent entre eux des pores dont l'ouverture serait de l'ordre de grandeur de l'épaisseur des coccolithes. Cette hypothèse est en très bon accord avec les résultats expérimentaux puisqu'on trouve par porosimétrie au mercure $r^0_{eq} = 0{,}39$ µm alors que le rayon moyen R des grains de calcite qui constituent les coccolithes est de 0,38 µm.

D. — Étude de modèles ayant les caractéristiques porales des craies étudiées

L'étude simultanée de l'arrangement des grains de calcite et de la géométrie de l'espace poral de la craie donne les éléments suivants :

- des photographies prises au MEB de la surface de la craie,
- la forme et les dimensions des coccolithes et des grains de calcite,
- la porosité P,
- le rayon r^0_{eq} des constrictions qui assurent la communication des pores entre eux.

Le modèle recherché doit, par conséquent, rendre compte des éléments connus de la structure du matériau et du mécanisme de remplissage de la craie par le mercure.

Partant de la description de la phase solide qui est constituée de grains de calcite, on a étudié, en suivant une démarche voisine de celle de Graton et Fraser (1935), divers modèles de systèmes poreux où les grains sont assimilés à des sphères empilées régulièrement. Dans un plan, on peut passer continûment d'un arrangement selon des carrés à l'arrangement le plus compact selon des triangles équilatéraux. Dans l'empilement des plans, on peut également passer continûment de la distance maximale compatible avec un contact à la distance minimale. La porosité varie ainsi entre 0,48 (système cubique simple) et 0,26 (système cubique à faces centrées ou hexagonal compact). Les seuils donnant accès à cette porosité se déforment depuis le carré curviligne jusqu'au triangle curviligne. Nous avons finalement retenu, en prenant comme critère la porosité qui est le seul paramètre qui puisse être directement pris en compte, les 2 systèmes simples suivants :

1. Le modèle « hexagonal compact » (1) qui est représenté sur la figure 4. Il correspond à un empilement compact de sphères. Cet arrangement ménage un seul type d'ouvertures ou constrictions pour les pores. Ces constrictions peuvent être caractérisées par le rayon r du cercle inscrit dans le triangle curviligne dont les sommets

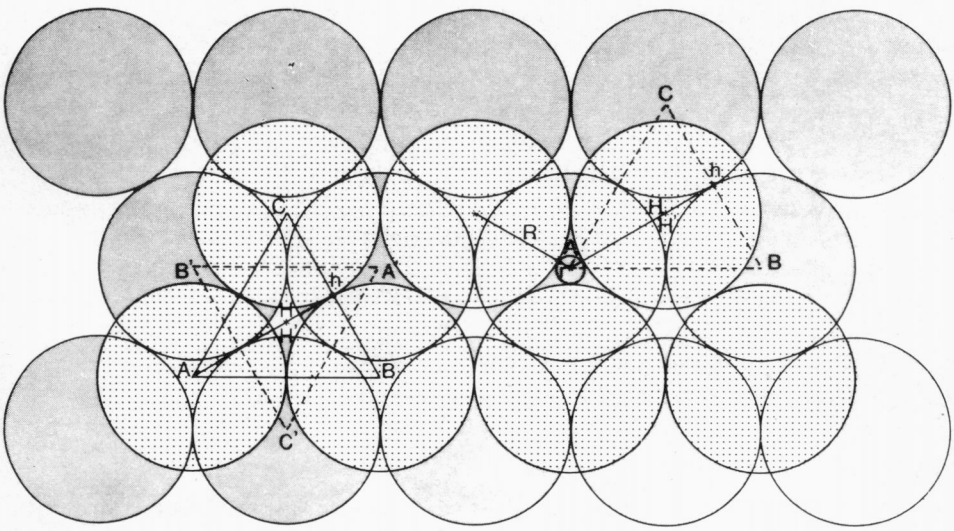


FIG. 4. — *Schéma représentant deux couches de sphères de rayon R assemblées selon le modèle « hexagonal compact »*. On note la présence de cavités tétraédriques constituées par l'empilement de 4 sphères (A, B, C, H′) et de cavités octaédriques constituées par l'empilement de 6 sphères (A, B, C, A′, B′, C′). HH′ est la trace de l'axe de symétrie de chacune des cavités qui est perpendiculaire au plan de la figure. On note aussi la présence d'un seul type de constrictions représentées par le rayon r du cercle inscrit dans un triangle curviligne.

Scheme showing two layers of spheres the radius of which is R arranged in close packed « hexagonal array » (P 6_3/mmc) *model.* We note the existence of tetrahedral cavities constituted by the stacking of 4 spheres (A, B, C, H′) and of octahedral cavities constituted by the stacking of 6 spheres (A, B, C, A′, B′, C′). HH′ is the trace of the symmetric axis of each cavity which is perpendicular to the plane of the figure. We also note the presence of only one kind of constriction represented by the radius r of the inscribed circle within the curvilinear triangle.

(1) et (2) Les arrangements « hexagonal compact » et « hexagonal » correspondent respectivement d'après « International Tables for X-Ray Cristallography » aux groupes P 6_3/mmc et P 6.

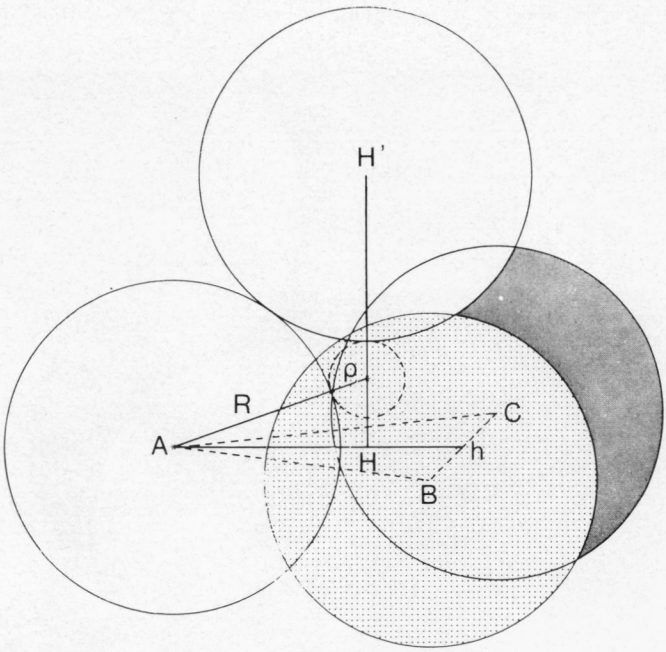


FIG. 5. — *Schéma représentant l'arrangement selon le modèle « hexagonal compact » de 4 sphères constituant une cavité tétraédrique.* Les points A, H, H' sont dans le plan de la figure. HH' est un axe de symétrie de la cavité. ρ est le rayon de la sphère inscrite dans la cavité.

Scheme showing the stacking according to the « hexagonal close packed » model of 4 spheres which constitute a tetrahedral cavity. The points A, H, H' are in the plane of the figure. HH' is a symmetric axis of the cavity. ρ is the radius of the sphere inscribed in the cavity.

correspondent aux contacts de trois sphères (fig. 4). Ce type d'empilement ménage par contre deux types de cavités (fig. 4) :

a) des cavités tétraédriques qui correspondent à l'empilement de quatre sphères (fig. 5),

b) des cavités octaédriques qui correspondent à l'empilement de six sphères (fig. 6).

Les cavités sont caractérisées par le rayon ρ de la sphère qui peut y être inscrite ;

2. Le modèle « hexagonal » (²) représenté sur la figure 7. Il correspond à l'empilement de couches hexagonales compactes distantes de 2 R. Ce modèle présente deux types de constrictions limitées par trois ou quatre sphères et un type de cavités prismatiques limitées par six sphères (fig. 8).

L'existence d'un seul type de constrictions pour le modèle « hexagonal compact » permet de prévoir une courbe de pénétration du mercure ayant un seul point d'inflexion. La présence dans ce modèle de cavités octaédriques dont le rayon ρ de la sphère inscrite est double de celui des cavités tétraédriques (tabl. 3) ne peut pas être mis en évidence par la méthode de porosimétrie au mercure puisque ces pores communiquent entre eux par des constrictions de même rayon r.

La présence de deux types de constrictions dans le modèle « hexagonal » ne conduit pas à une courbe de pénétration du mercure présentant deux points d'inflexion.

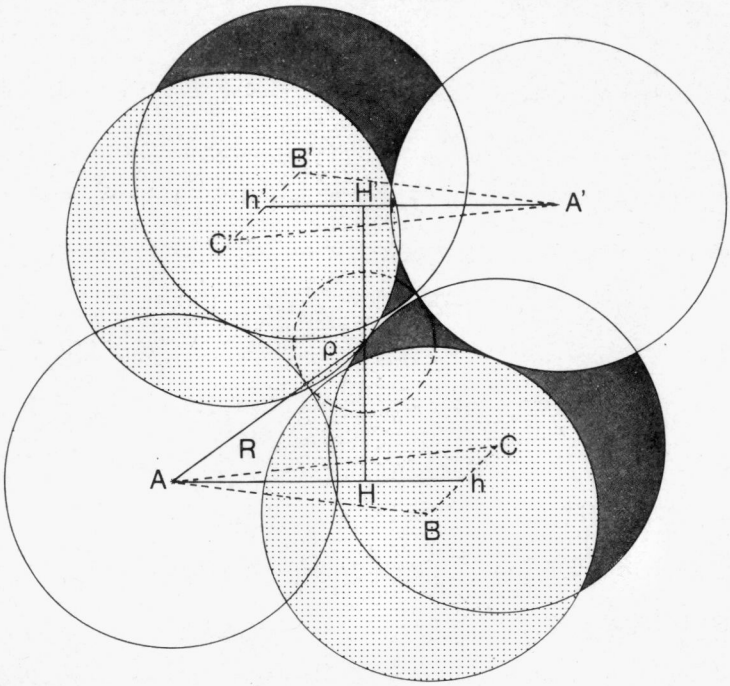


FIG. 6. — *Schéma représentant l'arrangement selon le modèle « hexagonal compact » de 6 sphères constituant une cavité octaédrique.* Les points A, A', H, H' sont dans le plan de la figure. HH' est un axe de symétrie de la cavité. ρ est le rayon de la sphère inscrite dans la cavité.

Scheme showing the stacking according to the close packed « hexagonal array » model of 6 spheres which constitute an octahedral cavity. The points A, A', H, H' are in the plane of the figure. HH' is a symmetric axis of the cavity. ρ is the radius of the inscribed sphere within the cavity.

En effet, le mercure peut emplir toute la porosité de ce système en suivant un chemin dont les ouvertures correspondent aux constrictions de plus grand rayon (tabl. 3 : $r/R = 0{,}414$).

Les courbes de pénétration du mercure prévues pour chacun de ces modèles sont donc tout à fait conformes à celles observées expérimentalement. On peut, en effet, prévoir pour chaque modèle une entrée rapide du mercure suivie du remplissage progressif des volumes restés vides qui ont la forme de dièdres curvilignes (fig. 2).

Ces modèles soulignent la limite de la porosimétrie à mercure qui ne donne que le r^0_{eq} des constrictions. Cette limite est d'autant plus à prendre en compte que l'aspect constriction est marqué. Il peut être quantifié pour les modèles étudiés par le rapport r/ρ (tabl. 3) qui sera d'autant plus petit que l'aspect constriction sera important. r/ρ égale l'unité en l'absence de constriction.

Dans le phénomène d'injection du mercure, seule la valeur 0,785 doit être considérée pour le système hexagonal tandis que 0,688 et 0,373 le sont pour le système hexagonal compact. Or, on constate expérimentalement que la quantité de mercure qui reste piégée dans T lorsque la pression est ramenée à la pression atmosphérique vaut 52 p. 100 de celle qui est entrée, tandis que la proportion vaut 25 p. 100 dans le cas de S_1 et S_2. D'après Hill (1960), ce piégeage résulte de l'existence de constrictions.

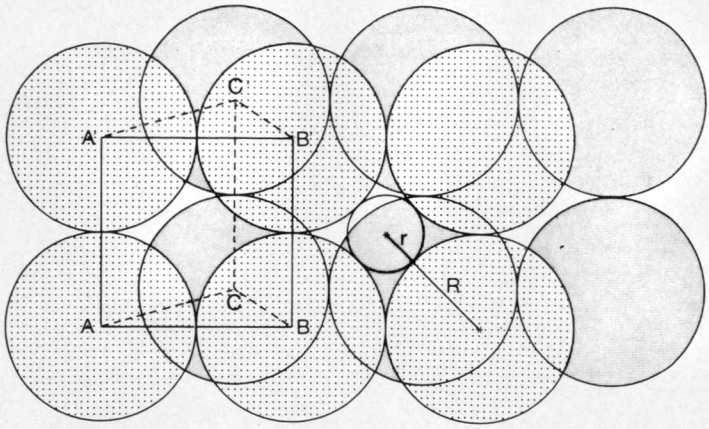


FIG. 7. — *Schéma représentant deux couches de sphères de rayon R assemblées selon le modèle « hexagonal »*. Les sphères ABA'B' ont leur centre dans le plan de la figure. Les sphères ABC et A'B'C' appartiennent respectivement à la couche inférieure et à la couche supérieure. On note la présence d'un type de cavités constituées par l'empilement de 6 sphères et de 2 types de constrictions. Les premières qui permettent le passage à travers une couche correspondent à un triangle curviligne. Les secondes correspondent aux accès latéraux des volumes vides situés entre les couches. Elles ont la forme de quadrilatères curvilignes. Le rayon r représenté sur cette figure correspond au cercle inscrit dans un quadrilatère curviligne.

Scheme showing two layers of spheres the radius of which is R *assembled according to an « hexagonal »* (P 6) *model*. The spheres ABA'B' have their center in the plane of the figure. The spheres ABC and A'B'C' belong respectively to the lower and the higher layer. We note the presence of one kind of cavity constituted by the stacking of 6 spheres and of two kinds of constrictions. The first constriction allows intrusion through the layer and has a curvilinear triangler form. The second one allows access to the empty spaces between the layers by lateral ways ; this access is by way of passage through curvilinear quadrilaterals. The radius r represented on this figure corresponds to the inscribed circle in a curvilinear quadrilateral.

Ces résultats nous conduisent à comparer T au modèle hexagonal compact et S_1 et S_2 au modèle hexagonal. Le tableau 4 rassemble les résultats expérimentaux et les résultats calculés à partir des modèles.

Du point de vue des rayons caractérisant les entrées de pores, il y a une bonne concordance entre r_{eq} trouvé pour T et r calculé pour le système hexagonal. De ce point de vue, S_1 et S_2 sont alors éloignés du modèle hexagonal, mais encore bien plus du modèle hexagonal compact. Les modèles devant rendre compte au mieux de tous les éléments connus, l'adéquation du modèle hexagonal compact au système poral de T, et du modèle hexagonal à celui de S_1 et S_2 est finalement très satisfaisante pour ce qui est des porosités et du phénomène de rétention du mercure, moins bon pour ce qui est des rayons des constrictions. Notons, malgré le caractère intuitif de la définition du rayon des constrictions calculé à partir des modèles (Gras, 1972), que le sens de variation de r^0_{eq} entre les diverses craies est retrouvé.

Ces modèles rendent compte de la forme des courbes de pénétration du mercure. Enfin, la concordance des modèles et des échantillons se retrouve dans l'observation au MEB. En effet, S_1 et S_2 conservent de nombreux coccolithes au sein desquels les grains de calcite gardent un arrangement plan qui pourrait expliquer leur meilleure adéquation au modèle hexagonal. T, plus détritique, possède une plus grande proportion de coccolithes brisés qui est à l'origine d'une structure plus compacte des grains de calcite, correspondant au modèle hexagonal compact.

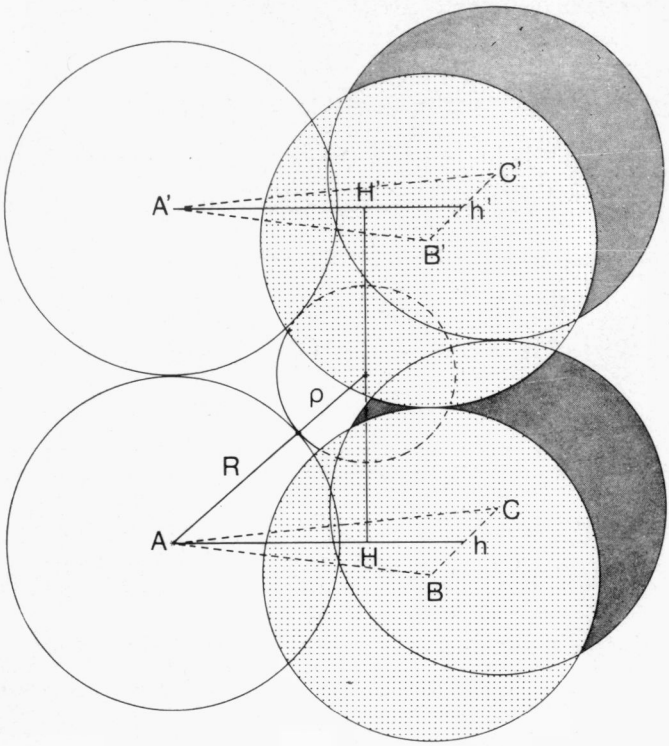


FIG. 8. — *Schéma représentant l'arrangement selon le modèle « hexagonal » de 6 sphères constituant une cavité prismatique.* Les points A, H, H', A' sont dans le plan de la figure. HH' est l'axe de symétrie d'ordre trois de la cavité. ρ est le rayon de la sphère inscrite dans la cavité.

Scheme showing the stacking according to the « hexagonal » model of 6 spheres which constitute a prismatic cavity. The points AHH'A' are in the plane of the figure. HH' is the symmetric axis of the cavity. ρ is the radius of the inscribed sphere in the cavity.

TABLEAU 3

Valeurs de r/R, ρ/R *et* r/ρ *pour les différents types de cavités existant dans les deux modèles étudiés*

Values of r/R, ρ/R *and* r/ρ *for different kinds of cavities which exist in both studied models*

Nature de la cavité	Nature de la constriction	r/R	ρ/R	r/ρ
tétraédrique	triangle curviligne	0,155	0,225	0,688
octaédrique	triangle curviligne	0,155	0,414	0,373
prismatique	triangle curviligne	0,155	0,528	0,293
prismatique	qualidratère curviligne	0,414	0,528	0,785

Les modèles simples d'empilement régulier de sphères rendent compte des différences entre les échantillons du point de vue de leur structure (MEB), du mécanisme d'entrée et de sortie du mercure, de leur porosité totale et du sens de variation des rayons de constrictions. Les écarts concernant ces derniers paramètres obligent à

TABLEAU 4

Porosité et rayon r des constrictions des pores déterminés expérimentalement et calculés dans le cas d'empilement de sphères de 0,380 μm de rayon selon deux modèles

Porosity and radius r of the pore constrictions determined by the experiment and calculated in the case of a stacking of spheres the radius of which is 0,380 μm according to two models

Modèle d'empilement	Origine des échantillons	Porosité : P		Rayon des constrictions (μm)	
		expérimentale	calculée	expérimental r^0_{eq}	calculé r
« hexagonal compact »	S_1	0,42	0,26	0,39	0,06
	S_2	0,41	0,26	0,39	0,06
	T	0,26	0,26	0,186	0,06
« hexagonal »	S_1	0,42	0,40	0,39	0,16
	S_2	0,41	0,40	0,39	0,16
	T	0,26	0,40	0,186	0,16

imaginer que l'accès à la porosité par le mercure se fait par des ouvertures plus grandes que celles prévues par les modèles. Il faut cependant noter que le fait d'avoir assimilé les grains de calcite à des sphères n'est qu'une approximation et que la présence de coccolithes ou de morceaux de coccolithes perturbe l'organisation des grains de calcite.

Cette régularité doit être constamment perturbée et les coccolithes ou morceaux de coccolithes doivent jouer un rôle dans cette perturbation. Des modèles plus complexes faisant intervenir ces perturbations pourraient seuls se rapprocher davantage de la réalité. Cependant les modèles réguliers simples nous donnent déjà une image explicable des chemins continus qui existent dans la craie, qui sont des successions de cavités et de constrictions de taille équivalente.

Conclusion

L'approche suivie qui consiste à décrire simultanément l'arrangement des grains de calcite et la géométrie de l'espace poral permet d'atteindre un certain nombre de paramètres structuraux du matériau poreux à partir desquels il est possible de bâtir un modèle. Sa validité repose sur le bon accord entre :

a) les données qui peuvent être calculées à partir du modèle et celles déterminées expérimentalement,

b) le mécanisme de pénétration du mercure prévu pour le modèle et celui obtenu au cours de l'expérience de porosimétrie au mercure.

La description d'un mécanisme de fonctionnement, associée à des données d'ordre structural, devrait en principe conduire à un modèle utilisable pour l'étude des propriétés hydrodynamiques des craies. C'est ce que nous nous proposons de vérifier.

Reçu pour publication en juillet 1979.

Summary

Structure of a porous medium : the chalk

The porous characteristics of chalks are studied in order to understand flow of water and solutes through such materials. This study may be separated into two parts :

1. the visualization of the stacking of the calcite grains from scanning electron microscope photographs,

2. the description of the porous space from porosity measurements made in two ways :

a) from the determination of the real and apparent density of the materials ;

b) by mercury injection.

The determination of some structural parameters of the materials allows us to build a model, the validity of which lies in good agreement with :

a) data which can be calculated from the model and its correlation with experimental results,

b) the mechanism of mercury injection deduced from the model and that obtained from mercury injection experiments.

The description of a working mechanism in relation to injection-exclusion analysis connected to structural data offers a way to obtain a model utilizable for the study of hydrodynamical properties of chalks.

Zusammenfassung

Struktur eines porösen mediums : die kreide

Die Untersuchung der Poreneigenschaften der Kreiden, die für zum den Verstehen der Transportprozesse von Wasser und Lösungen in diesen Materialien nötig ist, enthält zwei Ergänzungsaspekte :

1. Das Sichtbarwerden der Anordnung der Kalzitkörner aus Bildern vom Elektronenmikrosksop.

2. Die Beschreibung der Porenraums aus Porositätsmessungen :

a) durch die Bestimmung der wirklichen und sichtbaren Dichten der Materialien,

b) durch Quecksilberporenmessung.

Die Bestimmung ein gewisser Zahl von Strukturparametern des Materials hat es uns ermöglicht, ein Modell herzustellen, dessen Gültigkeit auf der guten Ubereinstimmung zwischen :

a) den Werten, die aus dem Modell errechnet sein können und den versuchsweise bestimmten Werten,

b) dem für die Quecksilbadurchdringung für das Modell vorgesehenen Mechanismus und dem während des Versuchs der Quecksilberporenmessung erzielten Mechanismus beruht.

Die Beschreibung eines Funktionsmechanismus, verbunden, mit Strukturgegebenheiten, müsste im Prinzip zu einem für due Untersuchung der hydrodynamischen Eigenschaften der Kreiden brauchbaren Modell führen.

РЕЗЮМЕ

Структура пористой среды мела

ВАШИЕ П., КАМЬЕ Р., ПРО Р.

Изучение свойств пор мела необходимо для понимания явлений переноса воды и растворённых веществ в этом материале. Оно состоит из двух приёмов :

1. наблюдение расположения зёрен кальцита на снимках, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа,

2. описание пространства поры с помощью измерения пористости, основанного на :

а) определении видимой и действительной плотности материала,
б) порозиметрии со ртутью.

Определение некоторых структурных параметров материала позволило нам строить модель, правильность которой зависит от согласия между :

а) данными, вычисленными с помощью модели, и данными определёнными в ходе опытов,
б) предусмотренным для модели механизмом проникновения ртути и механизмом, получащимся в ходе опыта порозиметрии со ртутью.

Описание механизма действия и данные о структуре вероятно приведут к модели, пригодной для изучения гидродинамических свойств мела.

Références bibliographiques

DIAMONDS S., 1971. Microstructure and pore structure of impact-compacted clays. *Clays and Clay Minerals*, **19,** 239-249.

GRAS R., 1972. Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux. *Ann. agron.*, **23** (2), p. 202.

GRATON L. C. and FRASER H. J., 1935. Systematic packing of spheres with a particular relation to porosity and permeability. *J. Geol.*, **43,** 785-909.

HILL R. D., 1960. An improved method of interpreting mercury penetration data. *Trans. British. Ceram. Soc.*, **59** (6), 198-212.

LAWRENCE G. P., 1978. Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. *J. Soil Sci.*, **29,** 299-304.

TALLON J. P., 1976. *Influence de la texture sur certaines propriétés géotechniques des craies franches*. Thèse Université Pierre et Marie Curie, Paris, 214 p.

WINSLOW D. N., 1978. The validity of high pressure mercury intrusion porosimetry. *J. Colloid, Interface Sci.*, **67** (1), 42-47.

Ann. agron., 1979, **30** (3), 265-279.

Effets de quelques pesticides sur la minéralisation de l'azote organique du sol, la nitrification et la cellulolyse

Ginette SIMON-SYLVESTRE

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 *Versailles*

Résumé

L'application de pesticides en agriculture peut entraîner des effets secondaires, notamment des actions sur la microflore du sol. Ce travail rapporte, pour trois processus biologiques (ammonification, nitrification et cellulolyse), les résultats obtenus après dix jours d'incubation dans quatre sols différents, avec cinq pesticides expérimentés à trois doses. Avec l'introduction de ces trois variables, toutes les possibilités se présentent : absence d'effet du pesticide, action dépressive plus ou moins marquée, stimulation variable du processus biologique considéré, inversion des actions suivant la dose de pesticide utilisée. Le pH des sols semble intervenir pour l'ammonification et la nitrification, les sols calcaires apparaissant souvent les plus défavorisés par l'application de pesticides.

L'emploi des pesticides s'est fortement accru cette dernière décade ; plusieurs raisons d'ailleurs concourent à expliquer l'utilisation relativement importante de ces produits en agriculture : l'apparition de maladies nouvelles, l'introduction de ravageurs jusque-là inconnus, le choix très vaste de pesticides mis à la disposition des praticiens par les firmes commerciales ; il faut également ajouter le développement de certaines techniques culturales, lesquelles incitent les agriculteurs à employer fréquemment ces produits leur permettant d'enrayer une maladie ou une attaque d'insectes.

Devant cet essor des pesticides, il s'avère utile de s'assurer que l'application de tels produits n'entraîne pas d'effets secondaires, en particulier sur les microrganismes du sol, êtres vivants sensibles aux variations des conditions de milieu. Le travail rapporté dans cet article comprend une étude au laboratoire des actions de plusieurs pesticides sur trois processus microbiens importants : la minéralisation de l'azote organique du sol et la nitrification, en ce qui concerne le cycle de l'azote, et la dégradation de la cellulose pour le cycle du carbone. Différentes raisons ont motivé le choix des produits : utilisation fréquente en pratique agricole, résultats préliminaires intéressants, données bibliographiques... Les diverses analyses effectuées permettent des comparaisons entre les produits et fournissent alors un aperçu de ce qui peut se passer dans le sol.

Mode opératoire

Quatre sols ont été utilisés dans ce travail. Leurs caractéristiques essentielles sont réunies dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Caractéristiques essentielles des sols expérimentés
Main characteristics of the soils used

N° des sols	I	II	III	IV
Origine	Versailles (« Grands Closeaux »)	Kerfeunten	Clermont-Ferrand (« Mon Désir »)	Bordeaux
Nature du sol	limon des plateaux	brun acide sur granite	noir, argilo-calcaire (Limagne)	rendzine grise
$CaCO_3$ p. 100	0	0	6,4	66,0
pH	6,95	5,7	7,9	8,4
C p. 1 000		36,0	21,0	14,5
N p. 1 000	1,14	3,70	2,12	1,58
Argile p. 100	16,7	10,0	40,5	26,5
Limon fin p. 100	20,2	11,0	17,6	20,4
Limon grossier p. 100		10,0		14,0
Classification d'après la texture (Hénin *et al.* 1969)	argilo-limono-sableux	sablo-limono-argileux	argile	argile limono-sableuse

Les déterminations ont porté sur cinq pesticides dont *quatre herbicides* (tabl. 2) ;

— une triazine : l'atrazine,
— une urée substituée : le métoxuron,
— un dérivé picolinique : le piclorame,
— un dérivé de l'acide carbamique, le phenmédiphame,

et *un nématicide* de la famille des carbamates, l'oxamyl, utilisé en cultures florales.

Par ailleurs, les études ont été étendues pour le sol I, argilo-limono-sableux, à *cinq autres herbicides* :

— deux urées : le diuron et l'isoproturon
— une amide : le napropamide
— une triazine : la terbutryne
— et une diazine : la pyrazone,

Pour chaque produit, trois concentrations ont été envisagées : la dose normale ou une dose voisine (tabl. 2), vingt fois et deux cents fois cette dose, afin d'amplifier les effets s'ils existent. Le pesticide est ajouté au sol en poudre, en solution ou sous forme d'une suspension, suivant la solubilité du produit et selon la concentration expérimentée : contrairement à ce qui se passe dans la pratique agricole où fréquemment le pesticide est appliqué à la surface du sol, là, il est mélangé à toute la terre, si bien que la dose appliquée se trouve diluée dans un certain volume de terre et non plus concen-

TABLEAU 2

Pesticides expérimentés

Pesticides used

Matière active	Dose utilisée par hectare pour la concentration × 1
Atrazine	3 450 g
Métoxuron	4 000 g
Phenmédiphame	6 litres
Oxamyl	10 000 g *
Piclorame	9 000 g *
Isoproturon	1 800 g
Diuron	4 650 g
Napropamide	1 000 g
Terbutryne	3 350 g
Pyrazone	3 200 g

* Les produits utilisés sont respectivement du Vydate (5 p. 100 d'oxamyl) et du Tordon 22 K (sel de potassium du piclorame employé à la dose normale en débroussaillement).

trée en surface, ce qui a alors pour effet de conduire, pour la même quantité de produit appliquée à l'hectare, à une concentration plus faible.

Plusieurs points communs caractérisent les modes opératoires des différentes expériences poursuivies :

— le sol employé est séché à l'air et tamisé à 2 mm ;

— pour permettre une meilleure aération, il est mélangé dans le rapport 1/1 avec du sable siliceux (compris entre 1 et 3 mm) traité à l'acide chlorhydrique et lavé à l'eau permutée ;

— les différents essais, tous en double exemplaire, sont effectués dans des flacons de 250 ml, à large ouverture. Le mélange 50 g de sol + 50 g de sable est amené à une humidité voisine de 50 p. 100 de la capacité de rétention ;

— pour éviter les pertes d'humidité des échantillons au cours de l'incubation, les flacons sont fermés avec un film de polyéthylène perméable aux gaz ;

— l'incubation dure 10 jours et a lieu à 25°, température reconnue d'après des essais antérieurs réalisés dans les mêmes conditions, comme étant celle pour laquelle les microrganismes du sol, notamment ceux responsables de la nitrification, sont les plus actifs.

Par ailleurs, une solution de sulfate d'ammonium (25 mg N) dont il est tenu compte pour l'humectation du sol, est ajoutée dans certains flacons. Cela permet soit l'étude de la nitrification, soit l'évaluation de la quantité d'azote minéral consommée par les microrganismes cellulolytiques du sol, lors de l'attaque de la cellulose apportée dans ces essais sous forme de poudre de cellulose, à la dose de 1 p. 100 (technique signalée antérieurement (Simon-Sylvestre, 1959)). Des flacons « témoins » comprenant :

— le sol seul

— le sol enrichi avec l'azote ammoniacal

— ou le sol traité avec les pesticides aux trois concentrations considérées, sont présents dans toutes les expériences.

Après incubation, les mélanges « sol + sable » sont agités avec du chlorure de calcium N/2 dans le rapport 1/5. Dans les filtrats, sont alors effectuées les analyses suivantes (selon les méthodes habituelles) : azotes ammoniacal et nitrique par distillation et azote nitreux par colorimétrie. Ces différentes déterminations permettent de connaître ;

— l'azote organique du sol minéralisé,
— l'azote ammoniacal nitrifié,
— l'azote minéral consommé lors de la dégradation de la cellulose.

Elles renseignent ainsi sur l'activité des microrganismes responsables.

Plusieurs expériences préliminaires ont été entreprises pour vérifier la dispersion des différents résultats obtenus avec les méthodes d'analyse choisies. A dix échantillons de sol provenant d'un même prélèvement (sol I avec lequel le plus grand nombre d'expériences a été réalisé), nous avons appliqué le mode opératoire décrit précédemment. Les extractions d'azote minéral ont été effectuées au temps t = 0 et après 10 jours d'incubation.

Au temps t = 0, les variations dues à l'hétérogénéité des échantillons de sols, à la technique d'extraction de l'azote minéral et à celle des dosages apparaissent faibles, quelle que soit la forme d'azote minérale considérée (tabl. 3). En effet le coefficient de

TABLEAU 3

Etude de la dispersion des résultats des divers dosages effectués au cours du travail (sol I)

Dispersion of the results in the different determinations carried out (soil I)

	Azote ammoniacal	Azote ammoniacal + azote nitrique	Azote nitreux
Temps t = 0			
moyenne	22, 34 mg N/50 g sol	23, 19 mg N/50 g sol	37 µg N/50 g sol
écart-type	0,131 mg N	0,157 mg N	1,05 µg N
coefficient de variation	0,58 p. 100	0,67 p. 100	2,84 p. 100
Temps t = 10			
moyenne	20, 42 mg N/50 g sol	22, 50 mg N/50 g sol	439 µg N/50 g sol
écart-type	0,144 mg N	0,245 mg N	59,90 µg N
coefficient de variation	0,70 p. 100	1,09 p. 100	13,64 p. 100

variation, voisin de 3 p. 100 pour la détermination des nitrites n'atteint pas 1 p. 100 pour les deux autres dosages. Par contre, après 10 jours d'incubation, c'est-à-dire après 10 jours d'activité de la microflore du sol, les coefficients de variation sont légèrement supérieurs (tabl. 3), probablement par suite d'un comportement variable entre échantillons des divers microrganismes du sol.

Ainsi, les variations de la composition de l'atmosphère du sol, modifiée par une répartition non identique du sable, un tassement différent du mélange sable + sol, une humidité non homogène, doivent jouer un rôle important vis-à-vis des organismes

essentiellement aérobies, telles que sont les bactéries de la nitrification. En ce qui concerne les nitrates, dont le taux n'est connu que par différence, les écarts-type pour les temps t = 0 et t = 10 sont respectivement 0,62 et 0,23 pour des moyennes de 0,86 et 2,07. Il faut noter qu'au départ de l'expérience (cf. tabl. 3), la teneur du sol en nitrates est très faible, les moindres écarts entraînant alors, une valeur élevée pour l'écart-type, et qu'après 10 jours d'incubation, cette teneur est encore peu élevée (10 p. 100 environ de l'azote ammoniacal introduit a été nitrifié).

Les calculs des différents écarts-type et des coefficients de variation correspondants apportent donc un complément d'information sur l'amplitude des variations des résultats obtenus et permettent de considérer les techniques utilisées comme satisfaisantes.

Résultats

Pour chaque processus microbien étudié, les résultats sont présentés dans un tableau à double entrée : sols et produits, ces derniers étant subdivisés pour les trois concentrations. Dans chaque case, la densité des signes traduit l'incidence du produit sur le phénomène microbien considéré.

I. — Minéralisation de l'azote organique du sol

Des résultats variés apparaissent dans le tableau 4 où sont représentées les incidences des pesticides vis-à-vis de la minéralisation de l'azote organique du sol. Celles-ci sont souvent faibles, avec des écarts par rapport aux témoins inférieurs à 25 p. 100.

D'une façon générale, il semble que pour les quatre sols expérimentés, les cinq pesticides choisis et les trois concentrations, toutes les situations soient représentées, situations qu'il est parfois difficile d'expliquer sur le plan biologique :

— absence d'effet pour une, deux ou les trois concentrations,
— un effet identique quelle que soit le concentration,
— une action stimulante ou inhibitrice croissant avec le taux de pesticide,
— un effet stimulant (ou inhibiteur) devenant inhibiteur (ou stimulant) avec une dose supérieure de pesticide,
— un effet inhibiteur (ou stimulant) seulement avec les concentrations élevées de produit,
— une action plus marquée pour la dose moyenne.

Néanmoins, les effets les plus nets apparaissent *positivement* pour :

— la forte dose de phenmédiphame et le sol I,
— les doses moyenne et forte d'oxamyl et le même sol I,
— la dose moyenne de piclorame et le sol III,

et *négativement* pour :

— la dose moyenne d'oxamyl et le sol IV,
— la dose forte de piclorame et le sol IV.

La récapitulation des résultats attire également l'attention sur le fait que la plus grande proportion des effets stimulants est trouvée pour le sol argilo-limono-sableux (sol I) (13 effets positifs, 1 négatif et 1 nul) alors que pour l'argile limono-sableuse-calcaire (sol IV), il n'est enregistré qu'un seul effet positif, les 14 autres étant négatifs.

TABLEAU 4

Influence d'un apport de pesticides sur la minéralisation de l'azote organique du sol

Influence of a pesticide supply on mineralization of soil organic nitrogen

Pesticides		Sols I	Sols II	Sols III	Sols IV
Atrazine	c × 1	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —
	c × 20	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —
	c × 200	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —
Métoxuron	c × 1		+ + + + + / + + + + +		— — — — — / — — — — —
	c × 20	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —
	c × 200	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —
Phenmédiphame	c × 1	+ + + + + / + + + + +		+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —
	c × 20	+ + + + + / + + + + +		— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —
	c × 200	+ + + + + + + + + + / + + + + + + + + + +	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —
Oxamyl	c × 1	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —
	c × 20	+ + + + + + + + + + / + + + + + + + + + +	— — — — — / — — — — —		— — — — — / — — — — —
	c × 200	+ + + + + + + + + + / + + + + + + + + + +	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +
Piclorame	c × 1	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —
	c × 20	+ + + + + / + + + + +	+ + + + + / + + + + +	++ ++ ++ / ++ ++ ++	— — — — — / — — — — —
	c × 200	— — — — — / — — — — —	— — — — — / — — — — —	+ + + + + / + + + + +	— — — — — / — — — — —

Stimulation

\+ + + + + ← inférieure à 25 p. 100 par rapport au témoin

++ ++ ++ ← comprise entre 25 et 50 p. 100

++++++++++ ← supérieure à 50 p. 100

Inhibition

— — — — — → inférieure à 25 p. 100 par rapport au témoin

— — — — — → comprise entre 25 et 50 p. 100

- - - - - - - - - - → supérieure à 50 p. 100

Une absence d'effet est traduite par une case vide.

TABLEAU 5

Influence d'un apport de pesticides sur la nitrification

Influence of a pesticide supply on nitrification

Pesticides		Sols I	Sols II	Sols III	Sols IV
Atrazine	c × 1	+ + + + + / + + + + +		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	
	c × 20			— — — — — — / — — — — — —	
	c × 200	+ + + + + / + + + + +		— — — — — — / — — — — — —	— — — — — / — — — — —
Métoxuron	c × 1	+ + + + + + + + + + / + + + + + + + + + +			
	c × 20	+ + + + + + + + + + / + + + + + + + + + +		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	
	c × 200	+ + + + + + + + + + / + + + + + + + + + +		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	— — — — — — / — — — — — —
Phenmédiphame	c × 1	+ + + + + / + + + + +		— — — — — — / — — — — — —	+ + + + + + / + + + + + +
	c × 20	- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	
	c × 200	0 0 0 0 0 / 0 0 0 0 0		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -
Oxamyl	c × 1	+ + + + + / + + + + +		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	
	c × 20	- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	0 0 0 0 0 / 0 0 0 0 0
	c × 200	0 0 0 0 0 / 0 0 0 0 0		0 0 0 0 0 / 0 0 0 0 0	- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -
Piclorame	c × 1				
	c × 20	— — — — — — / — — — — — —		- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -	
	c × 200	- - - - - - - - - - / - - - - - - - - - -		0 0 0 0 0 / 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 / 0 0 0 0 0

Stimulation — Inhibition

+ + + + + ⟵ inférieure à 25 p. 100 par rapport au témoin ⟶ — — — — —

++ ++ ++ ⟵ comprise entre 25 et 50 p. 100 ⟶ — — — — — —

++++++++++ ⟵ supérieure à 50 p. 100 ⟶ - - - - - - - - - -

inhibition totale de la nitrification ⟶ 0 0 0 0 0

Une absence d'effet est traduite par une case vide.

II. — Nitrification

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 5, complété par un histogramme (fig. 1) qui donne la répartition des formes d'azotes nitreux et nitrique.

Il faut mettre à l'écart le sol acide de Kerfeunten où la nitrification se fait très difficilement et où, en conséquence, il est difficile d'apprécier un quelconque effet des pesticides dans les conditions de l'essai.

Sol voisin de la neutralité : (sol I)

Lors d'un apport d'azote ammoniacal dans le sol I, la concentration en nitrites est faible (moins de 1 μg/g de terre), ce qui est en accord avec le fait que les nitrites sont généralement très fugaces dans le sol ; toutefois, il est observé une tendance à une diminution du taux de ces nitrites avec l'accroissement de la concentration en certains pesticides (phenmédiphame, oxamyl).

Pour la deuxième phase de la nitrification (passage de l'azote nitreux à l'azote nitrique), il est à remarquer, à la dose normale, un effet légèrement stimulant avec l'atrazine, le phenmédiphame et l'oxamyl, plus marqué avec le métoxuron (taux des nitrates presque triplé). Ces incidences favorables s'atténuent quand croissent les doses de pesticides ; elles peuvent même s'inverser. Ainsi, les nitrates, déjà presque nuls en présence d'oxamyl $\times$ 20, deviennent inexistants pour la forte dose de ce produit et également pour le phenmédiphame $\times$ 200.

Sols calcaires : (sols III et IV)

Dans les sols calcaires, l'addition d'azote ammoniacal est suivie de l'apparition rapide de nitrites en quantité importante, ainsi d'ailleurs que l'avaient déjà souligné Drouineau *et al.* (1948) dans leur étude sur la nitrification en sol calcaire. En 10 jours d'incubation à 25°, presque tout l'azote ammoniacal ajouté au sol est transformé en azote nitreux. Souvent, la présence à la dose normale d'un quelconque des cinq pesticides choisis entraîne déjà dans ces sols calcaires une diminution des nitrites : un seul effet stimulant apparaît avec le phenmédiphame pour le sol IV. Généralement, le taux des nitrites décroît quand augmente la concentration du pesticide et finalement, ces composés deviennent même inexistants ou à l'état de traces pour la dose élevée de piclorame, phenmédiphame ou d'oxamyl. La première phase de la nitrification en sol calcaire peut donc être ralentie, voire même inhibée dans les dix premiers jours d'incubation. Quant à la seconde phase, comme dans les échantillons témoin, elle n'existe pas, tout au moins pendant la durée des expériences : tout l'azote minéral retrouvé dans ces sols calcaires après un apport d'azote ammoniacal est toujours sous les formes ammoniacale ou nitreuse.

FIG. 1.

Effet de quelques pesticides sur la nitrification de l'azote ammoniacal apporté à différents sols : répartition de l'azote nitreux et de l'azote nitrique en fonction de la quantité de pesticides utilisée (c $\times$ 1, c $\times$ 20, c $\times$ 200 ; c $\times$ 1 : dose voisine de la dose pratique).

Effect of some pesticides on nitrification of ammonium nitrogen added to different soils : distribution of nitrons and nitric nitrogen with the amount of pesticides used (c $\times$ 1, c $\times$ 20, c $\times$ 200 ; c $\times$ 1 = practical use).

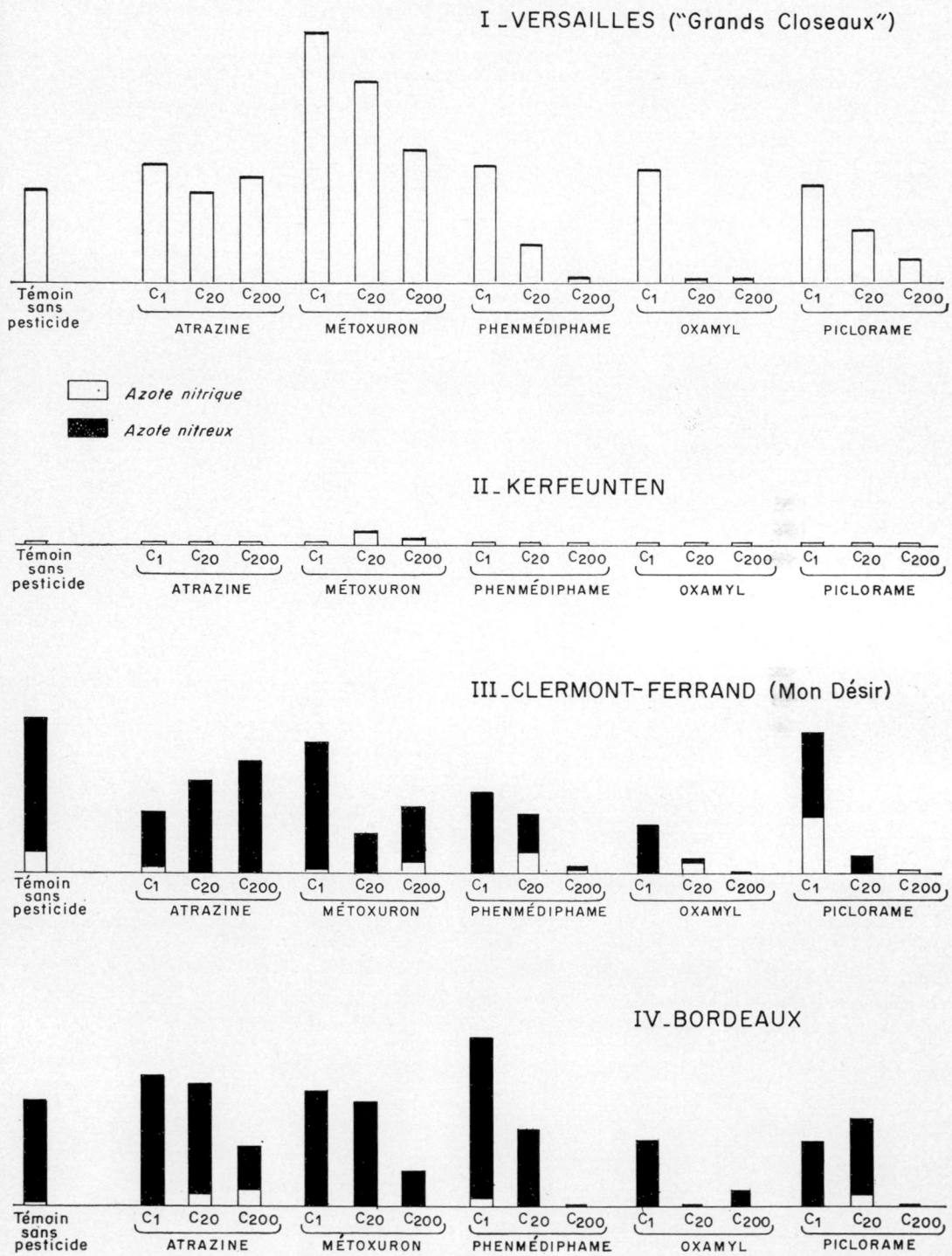

I_VERSAILLES ("Grands Closeaux")
Témoin sans pesticide
C1 C20 C200
ATRAZINE
MÉTOXURON
PHENMÉDIPHAME
OXAMYL
PICLORAME
Azote nitrique
Azote nitreux
II_KERFEUNTEN
III_CLERMONT-FERRAND (Mon Désir)
IV_BORDEAUX

FIG. 1.

TABLEAU 6

Influence d'un apport de pesticides sur la consommation d'azote minéral dans un sol enrichi avec de la poudre de cellulose

Influence of a pesticide supply on mineral nitrogen utilization in a soil treated with cellulose powder

Pesticides		Sols I	Sols II	Sols III	Sols IV
Atrazine	c × 1			— — — — — —	- - - - - - - - - - - -
	c × 20		+ + + + + + + + + +		— — — — — — — — — —
	c × 200		+ + + + + + + + + +	- - - - - - - - - - - -	- - - - - - - - - - - -
Méto-xuron	c × 1	+ + + + + + + + + +		— — — — — — — — — —	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
	c × 20	— — — — — — — — — —	+ + + + + + + + + +		+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
	c × 200	- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -		- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	— — — — — — — — — —
Phenmédiphame	c × 1	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +		+ + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
	c × 20			— — — — — — — — — —	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
	c × 200	— — — — — — — — — —	+ + + + + + + + + +	- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	
Oxamyl	c × 1	+ + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + +		+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
	c × 20	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +		+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
	c × 200	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	- - - - - - - - - - - - - - - - - - - -	
Picloram	c × 1	— — — — — — — — — —		+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	
	c × 20	— — — — — — — — — —		+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + +
	c × 200	+ + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + +	

Stimulation — Inhibition

+ + + + + ⟵ inférieure à 25 p. 100 par rapport au témoin ⟶ — — — — —

++ ++ ++ ⟵ comprise entre 25 et 50 p. 100 ⟶ — — — — — —

++++++++++ ⟵ supérieure à 50 p. 100 ⟶ - - - - - - - - - -

Une absence d'effet est traduite par une case vide.

III. — Dégradation de la cellulose

Il n'y a pas eu de mesure de la quantité de cellulose transformée comme dans la plupart des recherches sur la cellulolyse, mais simplement une évaluation de l'azote minéral immobilisé, c'est-à-dire utilisé à des fins microbiennes, lors d'un apport de matière organique (en l'occurrence de la poudre de cellulose) à un sol, en présence d'azote ammoniacal. Cet azote minéral disparu s'est transformé en azote organique microbien et l'intensité du phénomène, dépendant de l'activité des organismes cellulolytiques, fournit indirectement des précisions sur la cellulolyse, tout au moins à court terme.

Là encore, les expériences conduisent à des résultats fort divers suivant les pesticides et les sols (tabl. 6).

Ainsi, l'atrazine agit différemment suivant le sol : sans effet dans un sol argilo-limono-sableux, légèrement stimulante dans un sol sablo-limono-argileux humifère et acide, elle est défavorable dans les deux sols calcaires.

L'effet favorable constaté parfois pour la dose normale et la dose moyenne, s'atténue avec la concentration jusqu'à devenir inhibiteur (sols I et IV et métoxuron, sol IV et phenmédiphame),

ou bien au contraire, il reste stimulant pour toutes doses augmentant même pour la concentration la plus élevée (oxamyl et sol I).

Une incidence, inhibitrice pour la dose courante, reste généralement inhibitrice pour toutes les doses avec fréquemment une tendance à s'amplifier pour la concentration la plus forte (sol III et atrazine ou métoxuron).

Il n'apparaît pas possible en ce qui concerne la cellulolyse de classer les effets en fonction de la réaction des sols, comme dans les études précédentes.

Résultats complémentaires

Cinq autres pesticides ont été expérimentés dans le sol argilo-limono-sableux (sol I). Les différents résultats obtenus pour ce sol sont groupés dans le tableaux 7, 8 et 9 concernant respectivement :

— la minéralisation de l'azote organique du sol,
— la nitrification de l'azote ammoniacal apporté,
— la consommation d'azote minéral en présence de poudre de cellulose.

Il apparaît là encore, une grande variété dans les résultats, s'étalant suivant les produits et selon les concentrations, depuis l'absence d'action jusqu'à un effet très marqué, stimulant ou inhibiteur. Il semble difficile d'essayer de rapprocher entre eux les produits d'une même famille chimique, quant à leurs incidences sur la vie microbienne des sols.

Ainsi la cellulolyse, pour la dose faible de produit, n'est pas influencée par l'isoproturon, tandis que la présence du diuron la gêne et celle du métoxuron la favorise légèrement. A la forte concentration, l'isoproturon reste toujours sans effet, et les deux autres urées, le métoxuron principalement, sont fortement dépressives. Par ailleurs, la nitrification est presque triplée après une application de la petite dose de métoxuron, alors que le diuron n'exerce aucune action et l'isoproturon non plus.

TABLEAU 7

Influence d'un apport de pesticides sur la minéralisation de l'azote organique du sol (sol I)

Influence of a pesticide supply on mineralization of soil organic nitrogen (soil I)

Pesticides appliqués	mg d'N minéralisés pour 100 g de sol, après 10 jours à 25°		
	concentration × 1	concentration × 20	concentration × 200
Premier prélèvement de sol			
sans pesticide	1,935 ± 0,17 *		
diuron	2,28	2,28	2,10
terbutryne	2,10	2,98	2,51
Deuxième prélèvement de sol			
sans pesticide	1,935 ± 0,17 *		
atrazine	2,19	2,28	2,28
métoxuron.....	2,12	2,19	2,36
piclorame	2,45	1,49	2,36
oxamyl	2,45	3,41	5,60
phenmédiphame.....	2,36	2,36	4,38
pyrazone	1,84	2,45	2,28
isoproturon	2,54	2,45	1,75
napropamide	2,80	2,45	2,45

* Les essais ayant été réalisés en double exemplaire, il s'agit de la moyenne et de l'écart par rapport à cette moyenne. Par ailleurs, les expériences ont été effectuées à partir de deux prélèvements de sol, ce qui explique les différences, quelquefois importantes, trouvées pour les valeurs des échantillons « témoins ».

TABLEAU 8

Influence d'une application de pesticides sur la nitrification (sol I)

Influence of a pesticide supply on nitrification (soil I)

Pesticides appliqués	Pourcentage d'N ammoniacal nitrifié après 10 jours à 25°		
	concentration × 1	concentration × 20	concentration × 200
Premier prélèvement de sol			
sans pesticide	29,2 ± 5,95 *		
diuron	27,65	25,15	20,65
terbutryne	25,75	24,85	23,00
Deuxième prélèvement de sol			
sans pesticide	7,875 ± 1,05 *		
atrazine	10,10	7,70	9,30
métoxuron.....	21,50	16,85	11,40
piclorame	8,40	4,20	1,95
oxamyl	9,75	0,35	0
phenmédiphame.....	10,00	3,35	0
pyrazone	11,40	8,25	7,15
isoproturon	8,95	8,75	8,25
napropamide	9,10	8,95	9,10

* Voir tableau 7.

TABLEAU 9

Influence d'un apport de pesticides sur la consommation d'azote minéral dans un sol enrichi avec de la poudre de cellulose (sol I)

Influence of a pesticide supply on mineral nitrogen utilization in a soil treated with cellulose powder (soil I)

Pesticides appliqués	mg d'N minéral consommés pour 100 g de sol, après 10 jours à 25°		
	concentration × 1	concentration × 20	concentration × 200
Premier prélèvement de sol			
sans pesticide	8,14 ± 0,61 *		
diuron	6,48	6,39	5,34
terbutryne	8,23	7,26	7,35
Deuxième prélèvement de sol			
sans pesticide	5,34 ± 0,44 *		
atrazine	5,43	5,25	5,34
métoxuron.....	6,25	3,94	2,02
piclorame	4,64	6,83	3,85
oxamyl	6,30	9,18	9,28
phenmédiphame.....	11,55	5,78	3,68
pyrazone	5,95	5,51	7,11
isoproturon	4,90	5,43	5,78
napropamide	7,18	6,65	6,60

* Voir tableau 7.

Les deux carbamates, phenmédiphame et oxamyl, semblent parfois agir identiquement : action analogue, favorable et croissante avec la concentration de pesticide pour la minéralisation de l'azote organique du sol ; effet similaire pour la nitrification, stimulant pour la faible dose et très fortement inhibiteur allant jusqu'à la suppression de ce processus biologique pour la concentration élevée. Par contre, des divergences apparaissent dans la consommation d'azote minéral lors d'un apport de cellulose : quelle que soit sa concentration, l'oxamyl favorise toujours cette consommation d'azote minéral, tandis que le phenmédiphame, plus stimulant que l'oxamyl pour la dose courante, devient dépressif avec la forte concentration.

Discussion et conclusion

Une grande diversité dans les résultats apparaît dans cette étude au laboratoire en ce qui concerne les effets des pesticides vis-à-vis de la microflore du sol. La nature du sol, la composition chimique du produit, sa concentration sont autant de facteurs qui interviennent dans les trois processus biologiques étudiés. L'auteur, lui-même (1974), avait déjà attiré l'attention sur cette complexité des relations pesticides et microflore du sol dans une étude *in vivo*, et avait pu mettre en évidence des répercussions sur les cultures. Multiples sont déjà les recherches effectuées sur ces effets secondaires des pesticides, et presqu'aussi nombreux sont les résultats auxquels parviennent les chercheurs ainsi qu'en témoigne une récente revue bibliographique (Simon-Sylvestre et Fournier, 1979).

Cette variété des incidences s'explique d'ailleurs par le fait que ces produits de traitement peuvent influer sur les processus biologiques de deux manières, la voie la plus directe étant l'effet du produit lui-même ou de ses métabolites sur les microrganismes responsables du processus étudié. Pour l'autre voie, vraisemblablement la plus fréquente, le sol joue le rôle d'intermédiaire entre le pesticide et la microflore concernée et intervient par ses propriétés physico-chimiques. Il faut donc faire preuve de beaucoup de réserve dans l'énoncé des conclusions : chaque mesure d'activité biologique ne traduit que la résultante de plusieurs faits, stimulants, nuls et inhibiteurs. La stimulation de l'activité de certains germes après l'utilisation de pesticides n'est sans doute souvent qu'une action indirecte : il y aurait au départ un effet toxique envers d'autres germes, une modification de l'équilibre biologique, une diminution des compétitions microbiennes, le tout marqué par un développement plus important et une activité plus intense des germes qui résistent à ce pesticide et qui ne sont stimulés qu'indirectement.

Les résultats obtenus reflètent donc seulement l'effet global des pesticides. Par ailleurs, le fait d'avoir ajouté pour tous les essais des flacons « témoins » permet d'éliminer ce que le pesticide, de par sa nature chimique, — surtout pour la concentration $C \times 200$ — aurait pu fournir comme azote, utilisable immédiatement par les microrganismes du sol ou minéralisable après un séjour à l'étuve dans des conditions favorables de température et d'humidité. Nous supposons cependant que, s'il y a minéralisation partielle de l'azote du pesticide à l'étuve, cette minéralisation est identique en présence ou en absence d'azote ammoniacal, en présence ou en absence de cellulose.

Malgré la diversité des résultats, ce travail a permis de dégager quelques faits observés après dix jours d'incubation pour quatre sols différents et cinq pesticides expérimentés à trois doses.

Il a été possible pour la nitrification de grouper les différents effets observés suivant le pH des sols, les sols calcaires apparaissant toujours les plus défavorisées par l'application de pesticides et l'effet se faisant sentir dans la première phase de la nitrification. Pour la minéralisation de l'azote organique du sol, la réaction des sols semble également intervenir avec, là encore, une action souvent dépressive dans les sols à pH alcalin. Par contre, pour la cellulolyse, le pH ne peut plus être utilisé pour établir un classement des sols et l'explication des résultats obtenus doit être cherchée ailleurs.

Toute tentative de prévision d'effet des pesticides sur la microflore du sol reste donc difficile tant que ne seront pas effectuées des recherches plus complètes concernant les mécanismes d'action des différents pesticides et tant que ne seront pas dégagés les paramètres essentiels intervenant dans ces incidences.

Reçu pour publication en juin 1979.

Summary

Effects of pesticides on mineralization of soil organic nitrogen, nitrification and cellulose degradation

The use of pesticides in agriculture may induce secundary effects, especially on the soil microflora. This work gives for three biological processes (ammonification, nitrification and cellulose degradation) the results obtained *with five pesticides studied at three doses* after ten days incubation in four different

soils. With the introduction of these three variables every possibility may occur : no pesticide effect, more or less marked depressing effect, varying stimulation of the biological process considered, reversing of the effects according to the amount of pesticide used. The soil pH seems to interfere in ammonification and nitrification, the calcareous soils often appearing as the most unfavourably influenced by the use of pesticides.

Zusammenfassung

Wirkungen der Pflanzenschutzmittel auf die Mineralisierung des organischen Stickstoffes des Bodens, die Nitrierung und Zellulosezersetzung

Die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft kann Nebenwirkungen, insbesondere Wirkungen auf die Bodenmikroflora ausüben. Dieser Bericht gibt für drei biologische Vorgänge (Ammonifikation, Nitrierung und Zellulosezersetzung) die nach zehn Tage Inkubation in vier verschiedenen Böden mit fünf zu drei Dosen erprobten Pflanzenschutzmitteln erzielten Ergebnisse. Mit der Einführung von diesen drei Variablen sind alle Möglichkeiten gegeben : keine Wirkung des Pflanzenshutzmittels, mehr oder weniger ausgeprägte schwächende Wirkung, wechselnde Stimulierung des berachteten biologischen Vorgangs, Verkehrung der Wirkungen je nach der gebrauchten Pflanzenschutzmitteldosis. Die pH-Zahl des Bodens scheint an Ammonifikation und Nitrierung teilzunehmen, da die Kalkböden oft als die durch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln benachteiligtesten Böden erscheinen.

РЕЗЮМЕ

Влияние пестицидов на минерализацию почвенного органического азота, нитрификацию и целлюлолиз.

СИМОН-СИЛЬВЕСТР Ж.

Применение пестицидов в сельском хозяйстве может оказать последействие, особенно, влияние на микрофлору почвы. Настоящая работа даёт результаты аммонификации, нитрификации и целлюлолиза через 10 дней после инкубации в 4 разных почвах с 5 пестицидами по 3 дозы. Введение этих трёх переменных величин доставляет все возможности : отсутствие действия пестицида, более или менее заметное угнетающее действие, изменчивая стимуляция данного биологического процесса, инверсия действия в зависимости от дозы пестицида. Величина pH почвы влияет, по-видимому, на аммонификацию и нитрификацию, применение пестицидов стесняя часто известковые почвы больше других.

Références bibliographiques

DROUINEAU G., GOUNY P. et LEFÈVRE G., 1948. Sur la nitrification dans les sols calcaires. *C. R. Acad. Sci.*, 1, **226,** 957-958.

HÉNIN S., GRAS R. et MONNIER G., 1969. *Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques*, Masson et Cie, 332 p.

SIMON-SYLVESTRE G., 1959. *L'enfouissement des pailles dans le sol. Etude générale et répercussions sur la microflore du sol.* Thèse Université Paris, 103 p. et *Ann. agron.*, 1960, 5-53 et 177-219.

SIMON-SYLVESTRE G., 1974. Complexité des effets des pesticides sur l'équilibre biologique des sols et répercussion sur les cultures. *Agrochimica XVIII*, 4, 334-343.

SIMON-SYLVESTRE G., FOURNIER J.-C., 1979. Effects of the pesticides on the soil microflora. *Adv. Agron.*, **31** (sous presse).

Ann. agron., 1979, **30** (3), 281-303.

Etude de la productivité de l'agrosystème betteravier en Alsace Essai d'établissement d'un modèle empirique prédictif

A. P. CONESA, H. METTAUER, R. HAEFLINGER, R. TRENDEL, Y. TUAL et P. GROSS *

Station d'Agronomie I.N.R.A.,
68021 *Colmar*

* *Sucrerie d'Ernstein*
67150 *Ernstein*

Résumé

Cette étude se proposait d'étudier les causes de mauvais rendements en sucre des betteraves en Alsace à partir d'une enquête multidimensionnelle. Elle a conduit à une approche prédictive des rendements à partir des méthodes d'analyses statistiques utilisées : régression progressive et par l'analyse factorielle des correspondances, régression par boule. Les résultats des différentes méthodes ont permis d'expliquer 60 à 72 p. 100 de la variance des rendements. L'analyse statistique a confirmé l'effet négatif, connu, des excès d'azote minéral ($N_{NO_3} + N_{NH_4}$) sur les différentes composantes du rendement en sucre (teneurs en sucre et rendement en racines des betteraves). Les conditions particulières de 1976 (sécheresse) semblent avoir conduit à une forte minéralisation de l'azote organique. L'enquête globale a permis de replacer cet effet azote dans le cadre de l'agrosystème, et de montrer l'effet défavorable des précédents culturaux tels que la culture de tabac ou de luzerne, sur les rendements en sucre ; le phosphore semble atténuer l'effet défavorable des excès d'azote. L'étude a également permis de calculer, dans les conditions de l'Alsace en 1976, la relation positive entre les précipitations de juillet-août, et les rendements en sucre.

Plusieurs auteurs ont étudié les relations qui existent entre les rendements de betteraves sucrières et les facteurs du milieu. Gras *et al.* (1971) ont tenté de mettre en lumière les causes des importantes irrégularités des rendements constatées dans les sols légers sur craie du département de l'Aisne. Rémy et Marin-Laflèche (1974) ont porté leur attention sur les causes de mauvais départ de végétation des betteraves en sols de limon ; l'un d'entre nous (Conesa *et al.*, 1975-1976) a montré l'effet des facteurs de la nutrition et de la salinisation des sols sur les rendements en racines de betteraves.

Le travail que nous présentons fait partie d'une étude plus large intégrant, en particulier, les problèmes de la qualité technologique des betteraves sucrières que nous présenterons ultérieurement.

Outre son objectif pratique, l'étude se proposait une réflexion méthodologique sur l'utilisation des méthodes d'analyses statistiques pour tenter une approche prédictive des rendements.

1. — Méthodologie

L'analyse de l'agrosystème s'appuie sur des données obtenues sur quatre-vingt-deux placettes de 15 m² réparties à travers l'Alsace de manière que soient représentés de nombreux facteurs concernés, certains étant imposés : type de sol, climat, d'autres pouvant être modifiés : rotation, fertilisation, maladies parasitaires.

1.1. — *Variables caractéristiques de l'agrosystème*

Plusieurs facteurs et conditions du milieu* ont été étudiés, ils caractérisaient :

1.11. *Le peuplement de betterave.*

Décrit par plusieurs variables sur chaque station : rendement en racines, nombre de betteraves au mètre linéaire, régularité de la distribution des betteraves (à travers l'indice de dispersion $\sigma^2/\bar{x}$ = variance/moyenne de Greig-Smith, 1964), diamètre moyen des racines, longueur moyenne des betteraves.

1.12. *L'état nutritif du peuplement.*

Appréhendé à partir des analyses de limbes foliaires. Une étude préalable de la betterave en Alsace nous a amenés à choisir le début du mois de septembre comme période de prélèvement ; en effet cette période correspond à un *palier* des teneurs pour les principaux éléments nutritifs. Nous avons pu vérifier ([1]), sur vingt placettes, que les teneurs en azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium dans les limbes étaient représentatives des prélèvements globaux en ces éléments, par la plante. Elles donnaient donc une bonne image de l'état nutritionnel des peuplements étudiés, les corrélations entre teneurs dans les limbes et quantités d'éléments nutritifs absorbées par les plantes entières étant significatives au seuil de 1 p. 100.

1.13. *Le milieu.*

Nous avons effectué des profils culturaux de manière à examiner la présence éventuelle d'accidents structuraux, la profondeur réelle des labours, l'enracinement des betteraves.

Les observations en plein champ ont été complétées par des analyses physiques et chimiques en laboratoire : analyse granulométrique, mais aussi stabilité structurale (pourcentage d'agrégats stables à l'eau après les différents pré-traitements alcool, benzène), sensibilité au tassement des sols : $\Delta\lambda$ = différence de densité apparente entre minimum et maximum de la courbe Proctor.

Les résultats qui concernent les relations entre physique du sol, rendements en racines, morphologie des betteraves sont analysés en détail dans une autre publication (Mettauer *et al.*, 1978) ; nous nous limitons ici au rappel des points principaux.

Le niveau de fertilité chimique des sols a été appréhendé : teneurs en phosphore assimilable (méthode Joret-Hébert) et en potassium échangeable (extraction à l'acé-

---

* Au sens de Hénin.

([1]) Un rapport ronéoté est disponible à la Station d'Agronomie de Colmar où sont rapportés, dans le détail, les résultats que nous ne faisons que mentionner ici pour ne pas alourdir l'exposé.

tate d'ammonium). Nous avons également caractérisé le niveau potassique en utilisant la méthode d'extraction au tétraphénylborate de sodium 0,2 N, mais cette méthode n'a pas donné de résultats sensiblement différents.

Un autre facteur a retenu notre attention : les disponibilités en azote minéral du sol (nitrique et ammoniacal). Compte tenu de la dynamique complexe de cet élément, lessivage, minéralisation, réorganisation, nous avons effectué les dosages à différentes profondeurs, 0-20, 20-40, 40-60 cm et à différents stades du cycle végétatif de la culture : en avril, début de végétation, lors de la première décade de juillet, moment où débute la croissance active de la betterave sucrière, et début septembre, point de départ de la phase d'accumulation des sucres dans les racines.

Ces profondeurs de prélèvement étaient inférieures à celles adoptées par différents auteurs (Muller, 1978) qui prennent en compte des profondeurs de 90 et même 120 cm. Nous avons examiné si nos profondeurs de prélèvement conservaient un sens. Pour les trois périodes de prélèvement choisies, il existait une corrélation significative au seuil de 1 p. 100 (*) entre les teneurs en azote minéral du sol (0-20 cm) et du sous-sol (20-40 cm) : $r = 0{,}43^{++}$ en avril, $0{,}73^{++}$ en juillet et $0{,}71^{++}$ en septembre. Bien que les quantités mesurées ne représentent qu'une fraction de l'azote minéral présent dans les sols, elles peuvent néanmoins être considérées comme un bon *indice* des disponibilités en cet élément. Les fortes corrélations obtenues entre les résultats des analyses de sol et les rendements en betteraves semblent confirmer cette hypothèse. Notons que les différentes campagnes de prélèvement ont duré chacune cinq jours. L'année 1976 étant particulièrement sèche, aucune pluie n'a lessivé les réserves de nitrates pendant ces périodes de prélèvements effectués dans des conditions comparables.

En ce qui concerne les facteurs climatiques, nous avons utilisé les relevés pluviométriques provenant de seize postes météorologiques et les relevés de températures issus des six stations les plus proches des placettes étudiées. Les sommes de pluviométries et de températures prises en compte pour l'analyse concernaient les périodes du 1er mars au 30 juin, du 1er juillet au 31 août, du 1er septembre au 20 septembre et du 20 septembre à la récolte. Ce découpage était destiné à tenir compte des variations de besoins (en eau, en azote...) au cours du cycle végétatif de la betterave.

Les relevés pluviométriques ont été complétés par des mesures d'humidité des sols à deux profondeurs 0-20 cm, 20-40 cm, en début de végétation, en avril et à trois profondeurs 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, début juillet et début septembre. L'humidité du sol a été calculée relativement aux constantes hydriques.

$$\frac{(H - PF)}{H_e - PF} \times 100$$

où H = humidité du sol lors du prélèvement ; PF = humidité au point de flétrissement ; H_e = humidité équivalente.

Il aurait été souhaitable de suivre l'état hydrique du sol tout au long de la croissance de la betterave. Une telle démarche était difficile compte tenu du grand nombre de stations étudiées. Afin d'effectuer les prélèvements dans des conditions comparables ceux-ci ont été réalisés en un temps très court, pendant les phases critiques de la crois-

(*) $^{+}$ significatif à 5 p. 100.
$^{++}$ significatif à 1 p. 100.

sance et du développement de la betterave à sucre. La concordance des liaisons entre relevés pluviométriques, mesure d'humidité des sols et facteurs de la production de la betterave, confirme l'intérêt des mesures d'humidité.

1.14. *Etat phytosanitaire de la betterave.*

En collaboration avec nos collègues de la Station de Phytopathologie de Colmar, nous avons effectué des notations (1 à 5) de différentes attaques parasitaires : jaunisse, cercosporiose, observées en septembre et de la rhyzomanie observée à la récolte.

1.15. *Données concernant les techniques culturales.*

Elles ont été recueillies par interview des agriculteurs et portaient sur les précédents culturaux, les variétés semées, les dates de semis, les apports d'engrais, de fumier ou de lisier et les traitements phytosanitaires.

1.2. — *Traitements statistiques*

Les traitements statistiques appliqués au dépouillement de notre enquête se décomposent en quatre grandes étapes :

— Etude de structure ;
— Régression par l'analyse des correspondances (R.A.C.) ;
— Prédiction ;
— Etudes complémentaires.

1.21. *Etude de structure.*

— L'étude de la structure des données se fait d'abord au niveau de chaque variable par le tracé de l'histogramme et, dans le cas de variable quantitative, par le calcul de la moyenne et de l'écart-type.

— Les liaisons des variables 2 à 2 sont étudiées soit par un calcul de corrélation, soit par l'établissement de tables de contingences ou par comparaison de moyennes.

— Une synthèse de l'ensemble des liaisons est obtenue par des techniques d'analyse des données : une analyse en composantes principales (A.C.P.) (Bertier et Bouroche, 1975) sur les variables quantitatives et une analyse factorielle des correspondances (A.F.C.) (Benzecri, 1974) ont été effectuées.

L'A.F.C. est faite sur le tableau disjonctif complet (codage logique) obtenu en croisant l'ensemble des quatre-vingt-deux placettes avec l'ensemble des variables tant qualitatives que quantitatives ; ces dernières sont découpées en quatre classes de même effectif.

Cette étape permet de cerner la structure globale des données mais dans les traitements précédents, les variables à expliquer (rendement en sucre, teneur en sucre, etc.) sont plongées dans l'anonymat des variables.

Les résultats de cette étape ne seront pas entièrement présentés.

Pour tenir compte de l'asymétrie d'un grand nombre d'histogrammes, de la totalité des variables et pour pallier l'inconvénient précédent, notre choix s'est porté sur la régression par l'analyse des correspondances (R.A.C.).

1.22. *Régression par l'analyse des correspondances* (R.A.C.).

— La R.A.C. consiste, après avoir éclaté les variables quantitatives en classes, à effectuer une A.F.C. sur un tableau obtenu par juxtaposition de tableaux de contingences (Conesa, 1975 ; Cazes, 1976).

Ces tableaux de contingences sont les tableaux croisant la variable à expliquer (Y) avec toutes les variables explicatives (X_1, ..., X_h).

La forme du tableau est la suivante

TABLEAU 1

Forme du tableau

Shape of the table

	X_1	...	X_j	...	X_h
Y	K_{YX_1}	...	K_{YX_j}	...	K_{YX_h}

K_{YX_j} = tableau de contingences croisant Y et X_j

Dans notre cas, les variables à expliquer ont été découpées en six classes équiprobables (tabl. 1) et les variables explicatives en quatre classes équiprobables.

— Le nombre élevé de variables explicatives nous a amenés, essentiellement pour un problème de clarté des représentations et de redondance de l'information, à un criblage des variables.

Le criblage est obtenu en supprimant les variables ayant une contribution relative faible aux premiers axes factoriels, et celles apportant une information commune à un ensemble de variables déjà retenues. Ce dernier choix s'est fait au vu des résultats de la première étape.

— Une dernière R.A.C. a été effectuée ensuite sur les q variables retenues, en plaçant les n individus (placettes) en lignes supplémentaires au tableau 2.

TABLEAU 2

	X_1	...	X_j	...	X_q	$q \leq h$
Y	K_{YX_1}	...	K_{YX_j}	...	K_{YX_q}	

TABLEAU 3

1	010..0		0010.0		100.0
2	.....	...	.....	...	.....
.	.....		.....		.....
.	.....	...	.....	...	.....
n	001..0		1000.0		000.1

Le tableau 3 des individus est le tableau disjonctif complet, qui comporte des 1 ou 0 suivant que l'individu appartient ou n'appartient pas à la modalité de la variable considérée.

La visualisation des premiers plans factoriels nous renseigne sur les proximités existantes entre les différentes modalités de la variable à expliquer et l'ensemble des modalités des variables explicatives. Elle permet, en outre, de découvrir des liaisons de type non linéaire.

L'adjonction d'une placette supplémentaire au tableau 2 permet de la positionner dans l'espace des premiers axes factoriels et de noter les modalités de Y les plus proches.

Cette technique d'affectation est assez empirique et ne tient pas compte de l'information plus riche liée à la nature quantitative de Y.

Dans l'étape suivante nous proposons deux techniques susceptibles de remédier à celà.

1.23. *Prédiction.*

A partir des résultats de la R.A.C. nous définissons des variables coordonnées $(F_1, ..., F_3, ..., F_\alpha)$, $\alpha < 6$, où $F_i(j)$ est la coordonnée de la placette j sur l'axe factoriel i.

L'opération précédente a permis d'associer à l'ensemble des variables explicatives $(X_1, ..., X_q)$, un nombre restreint de variables synthétiques quantitatives $(F_1,..., F_\alpha)$ décrivant au mieux la variable Y.

Nous disposons donc d'un échantillon de variables quantitatives $(Y, F_1, ..., F_\alpha)$ sur lequel sont appliquées les deux techniques suivantes :

— régression progressive,
— régression par boule.

1.231. *Régression progressive.*

La régression progressive ou régression pas à pas (Draper et Smith, 1966) donne, après une introduction sélective des variables, une équation de régression de la forme suivante (2 variables retenues) :

$$y = aF_1 + bF_2 + C + \varepsilon. \qquad (1)$$

Pour améliorer la précision sur y, nous avons effectué une régression par boule.

1.232. *Régression par boule.*

La régression par boule (Lebeaux, 1974 ; Brenot, 1975 ; Cazes, 1976 ; Sabaton, 1977) permet au vu d'un n échantillon des variables $(Y, F_1, ..., F_\alpha)$ de prédire la valeur y en un point M de l'espace $E = R^\alpha$, associé aux variables $(F_1, ..., F_\alpha)$. L'espace E est muni d'une métrique.

Pour estimer cette valeur y, on recherche les s points (s fixé) de l'échantillon les plus proches de M au sens de la métrique, et on calcule la moyenne y* des valeurs y associées à ces s points.

La qualité de l'ajustement est, comme dans une régression multiple, donnée par le carré du coefficient de corrélation entre Y et Y*, Y* étant la variable prédictive associée aux points du n échantillon.

La régression par boule intègre l'information au voisinage d'un point et permet donc de connaître le comportement local.

Dans nos exemples s = 8 ou 10 ($\simeq$ 10 p. 100 de l'échantillon).

Pour appliquer les deux techniques précédentes à une placette supplémentaire, il suffit donc de calculer les coordonnées dans les premiers axes factoriels de la R.A.C.

Les coordonnées sont données par la formule suivante :

$$F_i(j) = \frac{(\lambda_i)^{1/2}}{q} \times \sum \{ a_{jk}\, G_i(k)/k \in Q \} \qquad (2)$$

ou

$F_i(j)$ = coordonnée de l'individu j sur l'axe i,
q = nombre de variables explicatives,
Q = ensemble des modalités des q variables,
λ_i = i^{eme} valeur propre,
$G_i(k)$ = coordonnée de la modalité k sur l'axe i,
a_{jk} = $\begin{cases} 1 : \text{si la modalité k est prise par l'individu j,} \\ 0 : \text{si non.} \end{cases}$

1.24. *Etudes complémentaires.*

Pour contrôler et confirmer certaines liaisons dégagées par la R.A.C., nous avons effectué des tests de χ^2 d'indépendance, des comparaisons de moyennes et des régressions progressives sur les variables quantitatives initiales.

2. — Résultats

Les rendements en sucre sont le produit du rendement en racines par les teneurs en sucre des racines, aussi examinons-nous ces composantes avant d'étudier les rendements en sucre. Les valeurs : minimum, maximum et moyenne sont portées sur le tableau 4. Afin d'alléger l'exposé, les contributions des variables étudiées à la varia-

TABLEAU 4

Seuils des classes et valeurs moyennes des différentes variables caractéristiques de la récolte

Levels of mean classes and values of the different characteristic variables of the crop

Variables	Mini	1	2	3	4	5	6	Maxi	Moyenne
Rendement racines....	32,7	44,8	51,7	58,3	66,3	74,4	85,8	58,7 t/ha	
Teneur sucre	9,3	13,8	14,3	14,8	15,3	16,2	18,4	14,9 p. 100	
Rendement sucre	3,7	6,4	7,6	8,6	10,0	11,5	14,0	8,8 t/ha	

bilité des facteurs expliqués (p. 100 de sucre, rendement en sucre) (Conesa *et al.*, 1975) sont représentées sur la figure 1, qui résume les principales relations mises en lumière par la R.A.C.

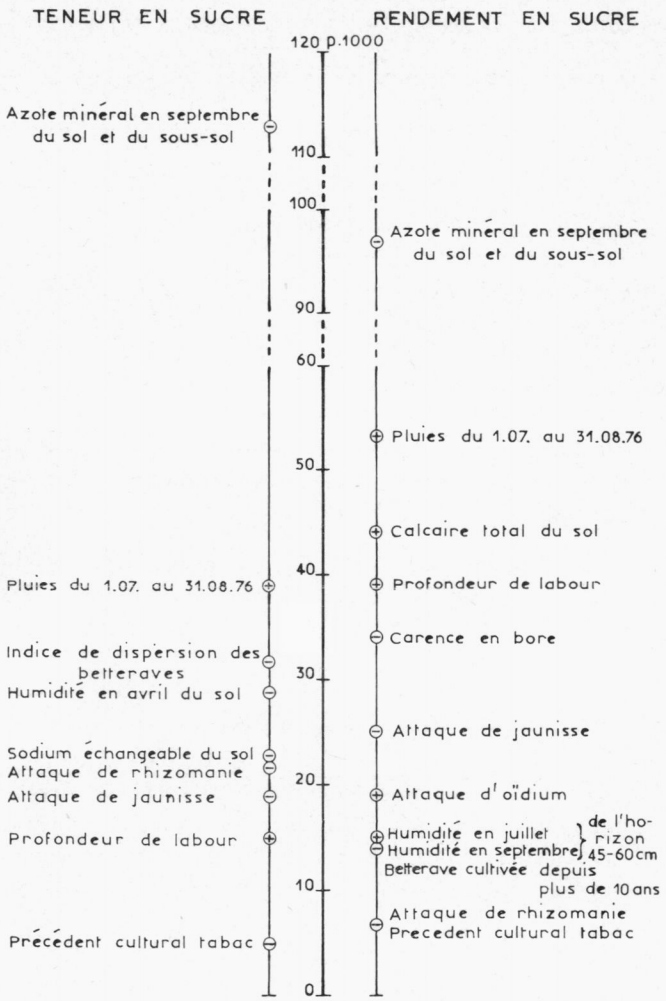


FIG. 1. — *Contribution des variables à l'inertie de l'axe* 1 *des teneurs et des rendements en sucre.*
⊕ Contribution positive ; ⊖ Contribution négative.

Contribution of the variables to the inertia of the axis 1 *of the sugar contents and yields.*
⊕ Positive contribution ; ⊖ Negative contribution.

2.1. — *Rendements en racines*

Ces résultats ayant été publiés (Mettauer *et al.*, 1978), nous nous limitons au rappel des principales relations mises en lumière. L'analyse statistique met en évidence l'effet des conditions physiques du sol sur les rendements en racines à travers les facteurs

caractérisant la taille des racines : longueur, circonférence. La sensibilité au compactage agit négativement sur la longueur des racines, tandis que le pourcentage de sable calcaire apparaît comme un facteur favorable. Au niveau de la nutrition, les pluies de juillet et août agissent également de façon positive sur les rendements. Le rendement en racines est lié négativement ($r = -0{,}38^{++}$) aux teneurs en azote minéral (nitrique et ammoniacal) du sol et sous-sol, en juillet.

2.2. — *Teneurs en sucre*

Les teneurs en sucre varient de 9,3 p. 100 à 18,4 p. 100 avec une valeur moyenne de 14,9 p. 100 (tabl. 4).

Les principaux facteurs du milieu qui contribuent aux teneurs en sucre sont représentés sur la figure 1. Le calcul des contributions à l'inertie de l'axe 1 (Conesa *et al.*, 1975) permet de hiérarchiser ces facteurs par ordre d'importance. Certaines contributions étant inférieures à 1 p. 100 nous avons utilisé d'autres critères (test de comparaison de moyennes, coefficient de corrélation de Pearson).

Cette analyse montre l'effet prépondérant des facteurs azote et eau. L'indice de dispersion exprime l'effet de l'implantation irrégulière des betteraves, due aux mauvaises conditions de levée liées à la sécheresse du printemps 1976, sur les teneurs en sucre (compétition intraspécifique).

Le calcul des corrélations entre teneurs en sucre et teneurs en azote des sols ($r = 0{,}60)^{++}$ confirme l'effet dépressif des excès d'azote, en 1976.

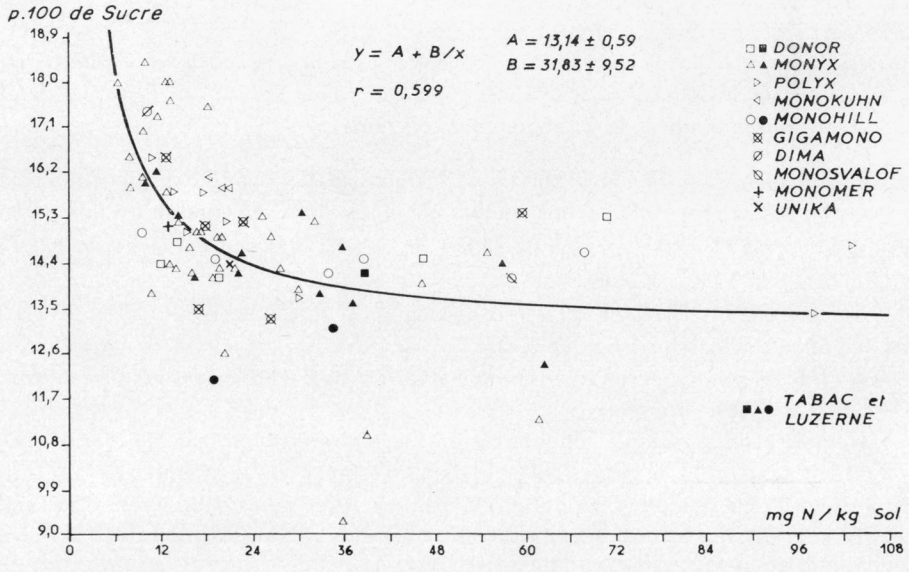


FIG. 2. — *Relation entre les teneurs en sucre des racines et les teneurs en azote* (ammoniacal + nitrique) *du sol + sous-sol en septembre* (avec mention des variétés pour les différentes stations).

Relation between the sugar contents of the roots and the nitrogen contents of the soil and subsoil (ammoniacal + nitric) *in September* (referring to the varieties for the different levels).

L'équation

$$y = 13{,}14 + \frac{31{,}83}{x}$$

y = teneurs en sucre,
x = teneurs en azote minéral ($N_{NO_3} + N_{NH_4}$) du sol et du sous-sol, en septembre représente le meilleur ajustement de cette relation (fig. 2). On constate également une liaison significative ($r = -0{,}33$)$^{++}$, négative, entre les teneurs en sucre et le test de stabilité de Hénin. Cette liaison peut s'expliquer par le fait que les sols à structure stable, bien aérés, favorisent la minéralisation de l'azote organique du sol, particulièrement forte en 1976, et de ce fait, accentuent l'effet dépressif de l'azote.

Les labours les moins profonds (< 24 cm) correspondent généralement à des teneurs en sucre inférieures à la moyenne ($\chi^2 = 2{,}2$) proche de la signification à 5 p. 100. Les faibles teneurs en sodium dans les sols (< 88 ppm) correspondent généralement à des teneurs en sucre supérieures à la moyenne ($\chi^2 = 13{,}1$)$^{++}$.

L'équation obtenue par l'analyse en régression progressive confirme l'action dépressive de l'azote, de la perméabilité, de la sensibilité au tassement et de la pluviométrie tardive, fin septembre, sur les teneurs en sucre dans les racines.

Cette équation permet d'expliquer 46 p. 100 de la variance des teneurs en sucre (y)

$$y = 18{,}006 - 0{,}107\ X_1 + 0{,}011\ X_2 - 0{,}159\ X_3 - 16{,}660\ X_4 - 0{,}014\ X_5 + \varepsilon$$

où

$X_1 = (N_{NO_3} + N_{NH_4})$ dans le sous-sol, en septembre, en mg/kg,
X_2 = précipitations en juillet-août, en mm,
X_3 = perméabilité (test de Hénin), en cm/h,
X_4 = sensibilité au tassement (différence entre densité apparente aux minimum et maximum Proctor),
X_5 = précipitations après le 21 septembre, en mm.

Ce calcul permet de hiérarchiser les facteurs et les conditions du milieu dont l'action semble la plus forte sur les teneurs en sucre, dans les conditions agro-climatiques de l'Alsace en 1976.

2.3. — *Rendements en sucre*

En 1976, les rendements moyens en sucre étaient de 8,8 t avec des valeurs extrêmes de 3,7-14 t/ha (tabl. 4).

Les différentes classes de rendements en sucre numérotées de 1 à 6, par ordre de rendements croissants, se projettent approximativement sur le premier plan factoriel (fig. 3) suivant une parabole, ce qui signifie qu'il y a liaison monotone entre le rendement en sucre et les variables explicatives prises en compte (les modalités 2 et 3 des rendements sont très proches ce qui permet de penser qu'elles auraient pu être regroupées).

L'effet du système cultural apparaît à deux niveaux : lorsque la betterave est cultivée sur la parcelle depuis plus de 10 ans et que le précédent cultural de la betterave est le tabac, les rendements sont plus faibles.

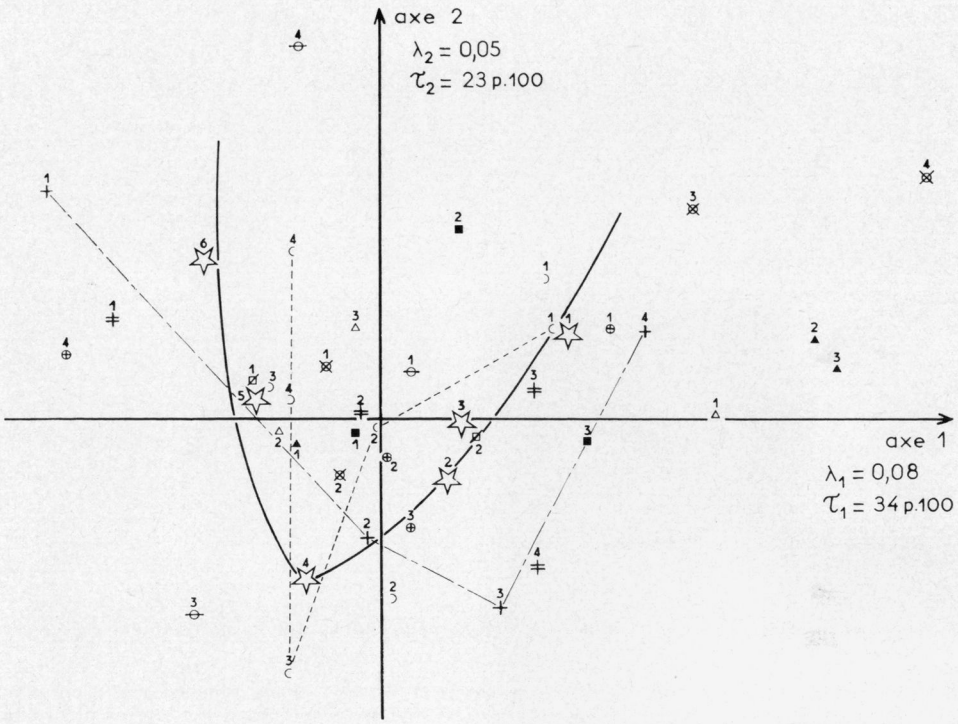


FIG. 3. — *R.A.C. sur les rendements en sucre.*
R. A. C. on the sugar yields.

☆ Rendement en sucre
⊕ Calcaire total du sol
\+ Azote du sol en septembre
≠ Azote du sous-sol en septembre
(p. 100 d'humidité de l'horizon 40-60 cm en juillet
) p. 100 d'humidité de l'horizon 40-60 cm en septembre
▨ Parcelle emblavée en betterave à sucre
1 depuis moins de 10 ans
2 depuis plus de 10 ans
⊖ Précédent cultural
1 blé
3 tabac
4 maïs
△ Profondeur de labour
1 inférieure à 24 cm
2 de 24 à 29 cm
3 supérieure à 29 cm

Etat sanitaire des plantes
▬ 1 ⊗ 1 ▲ 1 plantes saines
■ 2 et 3 plus ou moins atteintes de rhyzomanie
⊗ 2, 3 et 4 plus ou moins atteintes de jaunisse
▲ 2 et 3 plus ou moins carencées en bore

Le calcul des corrélations de Pearson confirme les relations entre les rendements en sucre et les teneurs en calcaire du sol ($r = 0{,}32$)$^{++}$ et l'effet dépressif des teneurs fortes en azote minéral du sol et du sous-sol en septembre (fig. 4). L'équation rendement en sucre

$$y = 6{,}35 + \frac{44{,}97}{x}$$

où x représente les teneurs en azote ($NH_4 + NO_3$) du sol et du sous-sol en septembre, présente le meilleur coefficient de corrélation ($r = + 0{,}54$)$^{++}$.

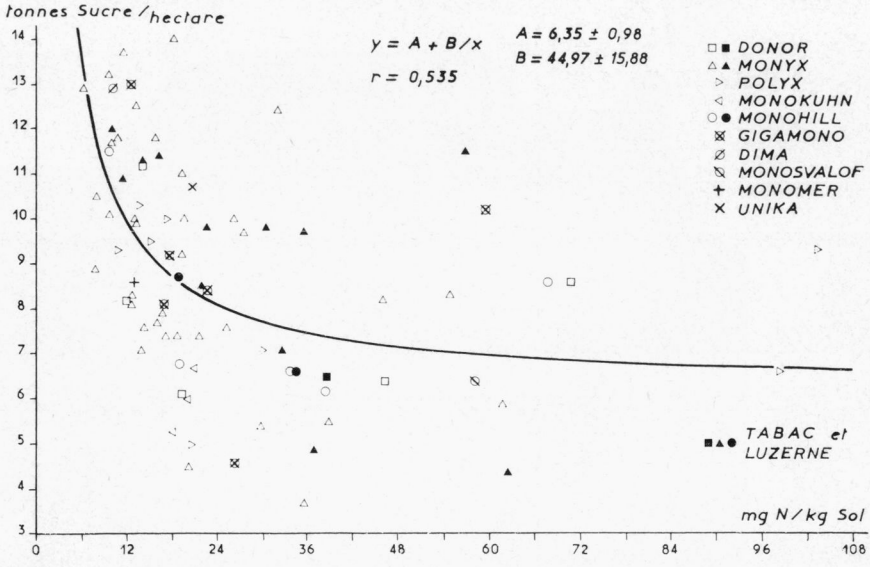


FIG. 4. — *Relation entre les rendements en sucre et les teneurs en azote* (ammoniacal + nitrique) *du sol + sous-sol en septembre* (avec mention de la variété pour chaque station ainsi que des précédents tabac et luzerne).

Relation between the sugar yields and the nitrogen contents of the soil + subsoil (ammoniacal + nitric) *in September* (refering to the variety for each level as well as some tobacco and lucerne preceding crops).

L'humidité du sous-sol, exprimée en pourcentage des réserves utiles, en juillet ($r = +\ 0{,}22)^{+}$ et en septembre ($r = 0{,}34)^{++}$ a un effet favorable sur les rendements en sucre.

En ce qui concerne l'effet du labour, le tableau 5 confirme ($\chi^2 = 16{,}5)^{++}$ l'effet de la profondeur du labour sur les rendements en sucre, les labours profonds (> 29 cm) correspondant aux rendements les meilleurs. Cet effet peut être rapproché de celui des disponibilités en eau des sols.

TABLEAU 5

Relation entre la profondeur du labour et les rendements en sucre ($\chi^2 = 16{,}5)^{++}$

Relation between the ploughing depth and the sugar yields ($\chi^2 = 16{,}5)^{++}$

	Profondeur labour PL1 $\leqslant$ 24 cm	Profondeur labour 24 $<$ PL2 $\leqslant$ 29 cm	Profondeur labour PL3 $>$ 29 cm	Total
Rendement en sucre $<$ 8,8 t/ha	17	20	6	43
Rendement en sucre $>$ 8,8 t/ha	1	27	11	29
TOTAL.....	18	47	17	82

La R.A.C. a montré une relation entre les rendements en sucre et le nombre d'années de présence de la betterave sur une parcelle. Les rendements moyens en sucre sont de 9,46 t lorsque la betterave est cultivée depuis moins de 10 ans et de 8,36 lorsqu'elle est cultivée depuis plus de 10 ans ($t = 1,96$ proche de la signification à 5 p. 100).

L'équation de régression multiple progressive :

$$y = 5,140 + 0,037\ X_1 + 0,349\ X_2 - 0,167\ X_3 - 0,262\ X_4 + 0,036\ X_5 - 19,060\ X_6 + \varepsilon$$

où

y = rendement en sucre, q/ha,
X_1 = précipitations en juillet et août, exprimées en mm,
X_2 = p. 100 de calcaire dans les sables,
X_3 = $(N_{NO_3} + N_{NH_4})$ dans le sous-sol en septembre, en mg/kg,
X_4 = perméabilité (test de Hénin) exprimée en cm/h,
X_5 = humidité (en p. 100 de la réserve utile) du sous-sol en avril,
X_6 = sensibilité au tassement (différence entre densité apparente au minimum et maximum Proctor (Mettauer *et al.*, 1978)

permet d'expliquer 60 p. 100 de la variance.

On peut noter que ce sont les mêmes variables qui « expliquent » les variations de rendement en sucre et celles de sa composante teneur en sucre. On remarque également que le classement obtenu par la régression progressive concorde assez bien avec les résultats de la régression par l'analyse des correspondances (fig. 1) puisque les deux méthodes hiérarchisent les mêmes variables discriminantes : précipitations en juillet-août, p. 100 de calcaire et azote minéral.

2.4. — *Essai de synthèse : prédiction des rendements*

Les résultats de la régression progressive sur coordonnées et de la régression par boule, pour le rendement en sucre sont les suivants :

2.41. *Régression progressive.*

La première variable introduite est F_1 qui explique 56 p. 100 de la variation totale de Y. La deuxième variable est F_2 qui porte l'explication à 61 p. 100, tandis qu'au troisième pas, la variable F_3, non significative, n'améliore plus sensiblement le pourcentage d'explication ($R^2 = 0,62$).

Les équations sont :

$$RS = -5,07\ F_1 + 8,83 \qquad R^2 = 0,56$$
$$RS = -5,07\ F_1 + 1,75\ F_2 + 8,83 \qquad R^2 = 0,61$$

où RS = rendement en sucre.

2.42. *Régression par boule.*

La régression par boule sur les 3 variables (F_1, F_2, F_3) montre un gain d'explication par rapport à la régression progressive (tabl. 6).

TABLEAU 6

Résultats de la régression par boule
Results of the regression for each bulb

	S	
Variables	8	10
F_1	$R^2 = 0,59$	$R^2 = 0,58$
F_1-F_2	$R^2 = 0,61$	$R^2 = 0,62$
F_1-F_2-F_3	$R^2 = 0,72$	$R^2 = 0,71$

S = nombre de voisins

2.43. *Simulation.*

Nous allons maintenant estimer, par les deux méthodes de régression précédentes, le rendement en sucre de deux parcelles fictives.

Exemples :

a) La parcelle 2, de rendement en sucre de 11,7 t/ha a été soumise à une faible fertilisation azotée (cinquante-quatre unités). Elle a en plus profité de conditions hydriques, pendant les mois de juillet et août, favorables à la croissance et d'un mois de septembre sec propice à l'accumulation de réserves.

La question qui peut se poser est la suivante :

Que serait-il advenu du rendement en sucre élevé si :

— la fertilisation azotée avait été plus forte,
— la profondeur de labour plus faible ($\leqslant$ 24 cm),
— l'herbicide mal approprié (herbicide 9).

Pour celà on va placer une parcelle fictive (2*bis*) dans l'espace des trois premiers axes factoriels, qui sera semblable à la parcelle 2 sur l'ensemble des variables, sauf pour les trois variables précédentes (fertilisation, profondeur de labour, herbicide).

Les coordonnées de (2*bis*) sont obtenues par la formule (2) qui donne :

$$F_1\,(2bis) = -\,0,051\ ; \qquad F_2\,(2bis) = -\,0,095.$$

La régression (1) nous donne $R_s^*\,(2bis) = 8,9$ t/ha

$R_s^* =$ estimation par (1).

La régression par boule nous donne $\bar{R}_s\,(2bis) = 8,9$ t/ha

$\bar{R}_s =$ estimation par boule.

Les deux estimations sont semblables. La chute de rendement est de 2,8 t/ha.

b) La parcelle 53, de rendement en sucre de 6,5 t/ha, présente une fertilisation azotée importante (cent cinquante unités), après un précédent tabac.

Les pluies faibles en juillet-août, la profondeur de labour faible, l'utilisation d'un

herbicide mal approprié ont eu un rôle dépressif sur les rendements en sucre. Comme dans l'exemple précédent, on a placé une parcelle fictive (53*bis*) dans l'espace des trois axes factoriels, semblable sur bien des points à la parcelle 53, mais qui s'en différencie par :

— une profondeur de labour moyenne,
— une fertilisation moindre,
— une irrigation pendant juillet et août, pour ramener l'humidité du sous-sol à sa réserve utile.

Les coordonnées de (53*bis*) sont les suivantes :

$$F_1 (53bis) = -0{,}067 \; ; \qquad F_2 (53bis) = -0{,}212.$$

La régression (1) nous donne

$$R_S^* (53bis) = 8{,}8 \text{ t/ha}.$$

La régression par boule nous donne

$$\overline{R}_S (53bis) = 7{,}6 \text{ t/ha}.$$

Ces résultats sont différents, mais on peut noter une augmentation substantielle du rendement en sucre (1,0 à 2,0 t/ha).

3. — Discussion et considérations agronomiques

Notre étude se proposait un objectif méthodologique et agronomique.

3.1. — *Au niveau méthodologique*

Nous avons, au cours d'une étude précédente (Conesa *et al.*, 1975-1976), examiné différentes méthodes d'analyses de l'agrosystème betteravier. Ici nous avons tenté une approche prédictive empirique à l'aide de deux méthodes, la régression par l'analyse des correspondances et la régression par boule. Les résultats des deux méthodes sont complémentaires et en accord avec ce que l'on sait du comportement de la betterave à sucre. Il convient cependant de souligner que les liaisons dégagées sur lesquelles s'appuient les modèles prédictifs, sont empiriques et dépendent des conditions particulières de l'Alsace et de l'année 1976. De tels résultats ne peuvent donc être extrapolés qu'en tenant compte de ces conditions spécifiques.

Les taux d'explication du rendement en sucre sont proches pour les différentes méthodes utilisées : régression pas à pas, régression par l'analyse factorielle, régression par boule :

régression pas à pas $R^2 = 0{,}60$

régression par l'analyse factorielle sur :

un facteur	$R^2 = 0{,}56$
deux facteurs	$R^2 = 0{,}61$
trois facteurs	$R^2 = 0{,}62$

régression par boule sur :

un facteur	$R^2 = 0,59$
deux facteurs	$R^2 = 0,62$
trois facteurs	$R^2 = 0,72$.

Le gain obtenu par la régression par boule n'était appréciable qu'avec le troisième facteur.

La faible différence au niveau du pouvoir explicatif (R^2) de ces méthodes, peut s'expliquer par deux arguments :

— l'augmentation du coefficient R^2 de la régression pas à pas, due à l'asymétrie des histogrammes ;

— la prise en compte des variables qualitatives dans la régression progressive, par le biais de leurs interrelations avec les variables quantitatives.

Les deux dernières méthodes sont plus robustes que la première, car elles découlent de la R.A.C. qui traite les variables quantitatives par éclatement en classes.

3.2. — *Au niveau agronomique*

Sur le tableau 7, nous avons représenté les principales relations entre variables explicatives et variables caractéristiques des rendements en sucre.

Plusieurs facteurs ont joué un rôle déterminant en 1976.

TABLEAU 7

Relation entre variables du milieu et le rendement en sucre

Relation between the variables of the environment and the sugar yield

	Rendement sucre	p. 100 sucre	Rendement racines
Azote minéral septembre	—	—	—
Profondeur labour > 23 cm	+	+	+
Précédent tabac-luzerne		—	
Variétés Monyx	+		
Variétés Donor	—		
Pluie juillet août	+	+	+
Pluie après 21 septembre		—	
Humidité sous-sol (juillet)			+
Na sol		—	
Rhyzomanie	—	—	
Jaunisse	—	—	
$CaCO_3$ sol	+		+
Bore	+		
Irrégularité des peuplements ID > 0,77		—	
Sensibilité au tassement	—	—	—
Betterave depuis plus de 10 ans	—		

3.21. *Constituants et comportement des sols.*

Les relations entre ces facteurs du milieu et les rendements ayant été étudiées précédemment (Mettauer *et al.*, 1978), nous rappelons seulement les relations négatives entre la sensibilité au compactage des sols étudiés et les teneurs et rendements en sucre. Signalons également la relation négative entre les teneurs en manganèse (EDTA) qui révèlent (Rémy et Marin-Laflèche, 1972) une hydromorphie temporaire du sol, et l'absorption du potassium par les plantes.

3.22. *L'azote minéral du sol.*

Ce facteur joue un rôle très important puisque toutes les composantes du rendement en sucre sont liées aux teneurs en azote du sol. Les fortes teneurs correspondent à une baisse des rendements en racines et des teneurs en sucre.

La mise en évidence de l'effet défavorable des excès d'azote sur les teneurs en sucre confirme les résultats signalés par divers auteurs (Draycott *et al.*, 1974 ; Gilles *et al.*, 1975 ; Burcky *et al.*, 1978). Dans notre étude, cet effet se manifeste pour les fortes teneurs en azote minéral du sol en début de culture, mais la relation est plus nette pour les fortes teneurs en septembre.

Le rendement en sucre est également affecté par les excès d'azote minéral du sol. Habituellement la production de sucre en fonction des doses d'azote suit une courbe de forme parabolique (Hills et Ulrich, 1976), les fortes doses provoquant une baisse des rendements. Dans notre cas, on constate, globalement, une baisse des rendements en sucre en fonction des teneurs en azote minéral des sols en septembre. Il semble donc que, par suite des fortes quantités d'azote minéral présentes dans le sol, on se trouve dans la partie descendante de la courbe de réponse de l'azote.

Les teneurs en azote minéral dosées en avril dans les sols (0-60 cm) étaient excessives ; elles variaient de 61 à 528 kg/ha avec une valeur moyenne de 248 kg/ha (tabl. 8). Au mois de septembre, les quantités trouvées étaient plus faibles mais res-

TABLEAU 8

Teneur en azote minéral du sol (0-45 cm) *à différentes dates* (*en* kg *d'*N *à l'*ha)
Mineral nitrogen content of the soil (0-45 cm) *at different dates* (*in kilogram of nitrogen per ha*)

Sol + sous-sol	Minimum	Maximum	$\bar{X}$
Avril	61	528	248
Juillet	26	338	112
Septembre	20	336	85

taient encore assez élevées ; 85 kg d'azote par ha en moyenne. Cette diminution peut s'expliquer par les prélèvements effectués par les betteraves. Sur vingt-deux parcelles ces prélèvements d'azote s'élevaient, en moyenne, à 210 kg/ha. On peut également expliquer cette diminution par une réorganisation de l'azote minéral en fin

d'été. En 1976, du fait des faibles précipitations, il est probable que les lessivages de nitrates aient été très limités ou que des remontées de nitrates, difficilement appréciables, soient venues perturber nos observations.

Les fortes quantités d'azote observées s'expliquent par les fumures azotées, souvent élevées, pratiquées par les agriculteurs. Celles-ci varient de 0 à 330 unités/ha avec une moyenne de 120 unités/ha. En outre, il est probable que les conditions sèches et chaudes de l'été 1976 aient favorisé la minéralisation de l'azote. Nous avons repris l'étude de l'azote des sols en 1977 et avons constaté des teneurs en azote plus faibles. Quoiqu'il en soit, en septembre, les quantités d'azote minéral restent élevées dans de nombreuses parcelles, pouvant atteindre jusqu'à 336 kg d'azote/ha. Ces quantités sont également liées au système de culture. On constate un reliquat important d'azote minéral après une culture de tabac et de luzerne. En avril, la plupart des stations où le tabac est un précédent de la betterave, possédaient des quantités d'azote nitrique *dans le sous-sol* supérieures à 49 kg/ha, alors qu'après précédents blé, orge ou maïs, elles présentaient des quantités inférieures :

Comparaison blé orge/tabac $\chi^2 = 5{,}37^{++}$.
Comparaison tabac/maïs $\chi^2 = 6{,}11^{++}$.

Il s'ensuit que, sur les treize stations avec précédent tabac, quatre seulement ont fourni des teneurs en sucre supérieures à la moyenne de 14,87 p. 100. Pour ces treize parcelles, la moyenne des teneurs en sucre est de 14,4 p. 100, valeur significativement inférieure à la moyenne de 15,2 obtenue pour les parcelles avec précédent orge-blé et dont les reliquats d'azote minéral étaient plus faibles.

Les teneurs en phosphore des sols variaient de 0,010 p. 1 000 à 0,890 p. 1 000 avec une valeur moyenne assez élevée de 0,230 p. 1 000.

Dans notre étude le phosphore apparaît comme un facteur favorisant la qualité technologique : on remarque un accroissement des teneurs en sucre lorsque le rapport $\frac{\text{P dans les limbes}}{\text{N dans les limbes}}$ augmente $(r = 0{,}23)^{+}$.

3.23. *L'eau.*

En 1976, année particulièrement sèche, les disponibilités en eau étaient un des facteurs essentiels des rendements en sucre. Du 1er mars au 31 octobre, le déficit hydrique $ETP_{Turc} - P$ a été de 297 mm à Mulhouse et Strasbourg et de 285 mm à Colmar (fig. 5). Le facteur eau a été appréhendé à travers l'humidité du sol en avril, juillet et septembre et la pluviométrie aux différentes périodes du cycle végétatif de la betterave. Les effets du facteur hydrique varient suivant le stade de développement atteint par la culture. Nos résultats confirment ceux signalés par différents auteurs Erie et French (1968), Legoupil (1971), Mingeau et Robelin (1977).

L'alimentation hydrique apparaît déterminante en *juillet* et *août* au niveau des rendements en sucre. La pluviométrie en juillet, août était de 70 mm à Strasbourg, 100 mm à Colmar et 110 mm à Mulhouse. On constate une relation significative entre la pluviométrie de juillet, août et les rendements en sucre, les pourcentages de sucre dans les racines à la récolte. Les résultats obtenus par Mingeau et Robelin (1977), dans des conditions climatiques comparables à celles de l'Alsace, permettent d'éclairer nos données. Selon ces auteurs, le recouvrement foliaire et l'activité photosynthétique

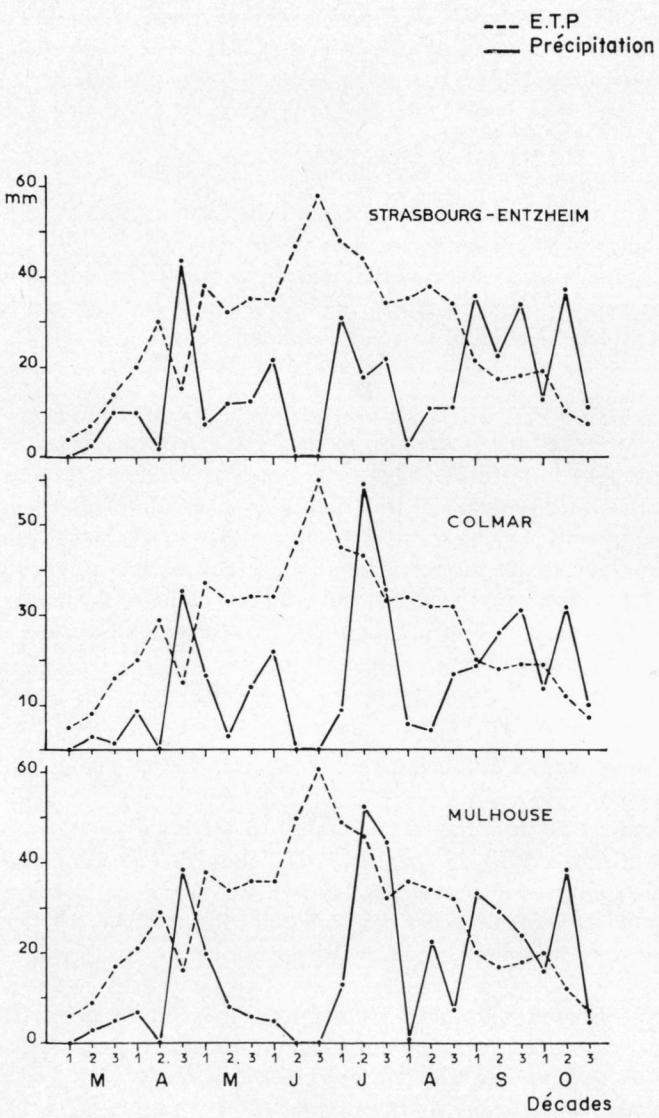


FIG. 5. — *Evapotranspirations potentielles et précipitations en Alsace* (année 1976).
Potential evapotranspiration and rainfall in Alsace (in 1976).

de la betterave sont maximum du 15 juin au 15 août période pendant laquelle s'élabore 70 p. 100 de la matière sèche totale. En septembre, octobre, les feuilles se vident vers les racines. Nous avons pu estimer l'effet moyen des pluies de juillet et août.

Rendement en sucre (en t/ha) = 5,308 + 0,037 mm de pluie. 50 mm supplémentaires de pluie tombée pendant cette période ont permis un gain de rendement de 1,85 t/ha, tandis que les pourcentages de sucre augmentaient de 1,47 p. 100.

On constate également que les pluies tardives ont provoqué une chute des teneurs

en sucre, ces pluies ayant stimulé un redémarrage de la végétation qui a mobilisé une partie des réserves racinaires. Jensen et Erie (1971) ont signalé l'effet défavorable des apports d'eau tardifs sur les teneurs en sucre. Nous avons calculé la relation entre les teneurs en sucre et les pluies tardives de 1976 :

$$\text{p. 100 de sucre} = 15{,}633 - 0{,}018\,3 \text{ mm de pluie.}$$

Dans les conditions de l'Alsace, une pluie de 50 mm après le 21 septembre a entraîné une baisse des teneurs en sucre de 0,9 p. 100.

On note également un effet du labour profond qui, en favorisant la colonisation du sol par les racines, conduit à une meilleure utilisation des réserves hydriques augmentant ainsi les rendements en sucre de la betterave.

3.24. *Le peuplement.*

Une trop forte densité, un indice de dispersion trop élevé ($I_D > 0{,}33$) sont le signe d'une compétition intraspécifique mal maîtrisée. On constate une liaison négative entre l'indice de dispersion et les teneurs en sucre dans les racines. Un indice de dispersion fort indique que l'implantation des betteraves a été irrégulière.

On constate par contre un accroissement du taux de sucre avec l'accroissement de la densité des betteraves ($r = 0{,}25)^+$ qui peut s'expliquer, au moins partiellement, par le fait que la forte densité a provoqué une meilleure utilisation de l'azote minéral et atténué l'effet dépressif des excès d'azote.

3.25. *Etat sanitaire des peuplements.*

En 1976, deux types d'attaques parasitaires ont affecté la production : la rhyzomanie et la jaunisse.

La rhyzomanie est une maladie virale qui a été mise en évidence, en France, par Putz et Vuittenez (1974). Les résultats de l'enquête montrent que les parcelles atteintes de rhyzomanie possèdent des teneurs moyennes en sucre (13,15 p. 100) significativement inférieures à celles des parcelles saines (15,3 p. 100) ce qui confirme l'effet dépressif de cette maladie parasitaire.

Nous avons noté dans les parcelles cultivées en betteraves depuis plus de 10 ans, que les rendements sont inférieurs à ceux des parcelles où la culture de betterave à sucre est plus récente. Ces résultats s'expliquent, au moins partiellement, par le fait que la culture de la betterave, sur une parcelle depuis plus de 10 ans, s'accompagne d'un accroissement des atteintes de rhyzomanie ($\chi^2 = 2{,}14$ proche de la signification).

4. — Conclusion

L'analyse de l'agrosystème betteravier nous a permis de mettre en évidence quelques facteurs qui, dans les conditions pédoclimatiques de l'Alsace, limitent la production de la betterave et expliquent la variabilité des rendements. Nous avons pu ainsi vérifier, le schéma classique : pendant la phase d'installation et la phase végétative, la betterave doit disposer de façon non limitante d'éléments nutritifs (azote en particulier) et d'eau. En phase d'accumulation des sucres, elle doit disposer du maximum d'ensoleillement (condition satisfaite en 1976) et du minimum d'azote.

Si l'utilité de l'azote est bien connue, nous avons pu montrer que, sur de nombreuses parcelles, les disponibilités en azote minéral étaient excessives, provoquant ainsi une baisse des rendements en sucre. Ces fortes teneurs en azote étaient partiellement dues à un système de culture mal adapté aux besoins de la betterave. Les conditions climatiques particulières de l'année 1976 ont accentuées ces effets par suite de la minéralisation intense des réserves d'azote organique et des entraînements réduits en profondeur. L'effet du système de culture s'est également manifesté par un accroissement des « attaques » de rhyzomanie lié à un « retour » fréquent de la betterave à sucre sur les parcelles depuis de nombreuses années. Le développement de la rhyzomanie s'accompagne d'une chute des teneurs et des rendements en sucre.

La betterave n'étant par irriguée en Alsace, l'eau est apparue comme un facteur déterminant de la production. L'analyse du système betteravier nous a permis de quantifier ces effets, favorables sur les rendements en sucre si l'alimentation hydrique en juillet-août est correcte, défavorables sur les teneurs en sucre si des pluies tombent en fin du cycle de la betterave.

L'analyse statistique nous a, en outre, permis de hiérarchiser les facteurs, les résultats de la régression par l'analyse des correspondances étaient globalement en accord avec ceux des analyses en régression.

Enfin, les modèles de prédiction fournissent un premier essai de synthèse empirique, qui permet d'estimer l'effet de tel ou tel choix de l'agriculteur sur la production.

Reçu pour publication en juin 1979.

Summary

Productivity of sugar beets in Alsace : a predicative model of the yields

This research intended to study the causes of the bad sugar yields of beets from a multidimensional survey in Alsace. It led to a predicative approach of the yields from the methods of the statistical analysis which were used : gradual regression and regression for each bulb through the factorial analysis of correspondences. The results of the different methods have allowed to explain 60 to 72 p. 100 of the variance of the yields. The statistical analysis has borned out the previously known negative effect of the excesses of the mineral nitrogen ($N_{NO_3} + N_{NH_4}$) on the different components of the sugar yield (the sugar contents and the root yields of beets). The special conditions of 1976 (dryness) seem to have led to a strong mineralization of the organic nitrogen. The global survey has allowed to put this nitrogen effect back within the agrosystem, and to show the unfavourable effect of the preceding crops, such as tobacco or lucerne cultivations, on the sugar yields ; phosphorus seems to reduce the unfavourable effect of the nitrogen excesses. The research, in the 1976 conditions in Alsace, has also allowed to measure the positive relation between the July-August rainfall and the sugar yields.

Zusammenfassung

Untersuchung über die Ertragsmöglichkeiten der Zuckerrübenkultur im Elsass Aufstellungsversuch eines Prognosenmodels

Die Versuchsarbeit sollte die Ursachen der schlechten Zuckererträge im Elsass mit Hilfe einer Erhebung untersuchen. Diese Erhebung hat zu einer Ertragsprognose geführt, welche sich auf verschiedene statistische Methoden stützt : progressive Regressionen, faktorielle Analyse der Korrespondenzen, « Kugel » Regressionen. Die angewanden Methoden ermöglichten 60 bis 72 p. 100 der Ertragsvarians zu erklären. Sie bestätigten, unteranderem, den bekannten negativen Effekt eines Stickstoffüberschusses (NO_3-N und NH_4-N) auf die verschiedenen Zuckerertragskomponenten (Zuckergehalt-

Rübenertrag). Die auserordentliche Trockenheit des Jahres 1976 hat scheinbar zur einer starken Mineralisierung des organischen Stickstoffes geführt. Die Erhebung erlaubte diesen Stickstoffeffekt in den Zuckerrübenanbau (Agrosystem) einzugliedern und somit den ungünstigen Einfluss zweier Vorfrüchten (Tabak und Luzerne) zu erklären. Der Phosphorgehalt scheint dem Effekt des Stickstoffüberschusses entgegenzuwirken.

Die im Elsass ausgeführte Untersuchung hat auch die positive Korrelation zwischen den im Juli und August gefallenen Niederschlägen und den Zuckererträgen hervorgehoben.

РЕЗЮМЕ

Изучение продуктивности свекловичного севооборота в эльзасе.
Опыт разраъотки эмпирической модели прогноза.

КОНЕСА А. П., МЭТТАУЕР Г., ГЕФЛИНГЕР Р., ТРЕНДЕЛЬ Р., ТУАЛЬ И., ГРОС П.

Целью настоящей работы — изучение причин низкого выхода свкчовичлочо сахара в Эльзасе на основании многомерной анкеты. Это привело к прогнозу выхода с помощью разных статистических методов : прогрессивная регрессия, факториальный анализ соответствий итд. Результаты разных методов объясняют 60-72 % отклонений выхода. Статистический анализ утвердил известное отрицательное влияние избыточного минерального азота ($N\,NO_3 + N\,NH_4$) на разные составные части выхода сахара / содержание сахара и выход корней свекловицы /. Засуха 1976го года привела к сильной минерализации органического азота. Общая анкета позволила поставить влияние азота в рамки севооборота и показать неблагоприятное влияние предшественников / табак и люцерна / на выход сахара ; по-видимому, фосфор уменьшает неблагоприятное влияние избыточного азота. Удалось тоже вычислить положительную зависимость между вочходои сахара и осадкаии г 7изасе г шоие и г агччсте 1976 чо чода.

Références bibliographiques

BENZECRI J. P., 1974. *L'analyse des données*. Tomes 1 et 2. Dunod, Paris.

BERTIER P., BOUROCHE J. M., 1975. *Analyse des données multidimensionnelles*. PUF, 170 p.

BURKY A., BEISS U., WINNER C., DRATH L., SCHIWECK H., 1978. Versuche zur Bedeutung des Nährstoffangebotes für die Qualität der Zuckerrübe. *Zucker-ind.*, **103** (3).

BRENOT J., CAZES P., LACOURLY N., 1975. Pratique de la régression : qualité et protection. *Cahiers du Bureau Universitaire de Recherche Opérationnelle* (B.U.R.O.), n° 23, 9, 84.

CAZES P., 1975. Etude de quelques propriétés extrémales des facteurs issus d'un sous-tableau d'un tableau de Burt (Extr-Fac). *Publication du laboratoire de statistique*, Université Paris VI.

CAZES P., 1976. Régression par boule et par l'analyse des correspondances. *Revue de statistique appliquée*. XXIV, 4, 5-22.

CONESA A. P., ROUX M., BAILLON P., HADJ MILOUD D., MAGINIEAU C., LEMAIRE G., 1975. Etude globale de la culture de la betterave à sucre sur le périmètre du Haut Chéliff. I. — L'analyse factorielle des correspondances. *Ann. agron.*, **26** (6), 709-740. II. — Analyse en régression. *Ann. agron.* (1976), **27** (1), 61-84.

DRAPPER N. R., SMITH H., 1966. *Applied regression analysis*. J. Wiley, New York, 408 p.

DRAYCOTT A. P., DURRANT M. J., LAST P. J., 1974. Effect of fertilizers on sugar beet quality. *Intern. sugar J.*, **76,** 355-358.

ERIE L. J., FRENCH O. F., 1968. Water managment of fall planted sugar beets in salt river valley of Arizona. *Trans. Am. Soc. Agri. Engrs.*, **11,** 792-95.

GILLES J. F., REUS J. O. et LUDWICK A. E., 1975. Prediction of nitrogen status of sugar beets by soil analysis. *Agron. J.*, **67,** 454-459.

GRAS R., OSTY Pl., DEFFONTAINE J. P., MARIN LAFLÈCHE A., 1971. Contribution à l'étude de la culture de la betterave à sucre sur des sols légers du Laonnais et de la Champagne de l'Aisne. *Ann. agron.*, **22** (5), 537-584.

GREIG-SMITH P., 1964. *Quantitative plant ecology*. Butterworth, Londres, 256 p.

HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural*, Masson édit.

HILLS F. J., ULRICH A., 1976. Soil nitrate and the response of sugar beets to fertilizer nitrogen. *Journal of the American Society of Sugar beet Technologists*, **19,** (2), 118-124.

JENSEN M. E., ERIE L. J., 1971. *Advances in Sugar beet Production : principal and practices Irrigation and Water managment*. The Iowa state University Press Ed.

LEBEAUX M. O., 1974. *Programme de régression et de classification utilisant la notion de voisinage.* Thèse de 3e cycle Université Paris VI.

LEGOUPIL J. C., 1971. Les besoins en eau des cultures dans le Haut Chéliff. *Bull. Rech. agron. Gembloux. Hors série,* 254-265.

METTAUER H., TUAL Y., HAEFLINGER R., CONESA A. P., TRENDEL R., 1978. L'influence des propriétés physiques et mécaniques du sol sur la morphologie et le rendement en racine de la betterave à sucre. *Ann. agron.*, **29** (2), 147-167.

MINGEAU M. et ROBELIN M., 1977. La betterave sucrière et l'eau. *Bull. techn. Inform.*, **319-320,** 231-237.

PUTZ C., VUITTENEZ A., 1974. Observations de particules virales chez les betteraves présentant en Alsace des symptômes de « rhyzomanie ». *Ann. Phytopath.*, **6** (2), 129-318.

RÉMY J. C., MARIN LAFLÈCHE A., 1974. Résultats d'une enquête sur les causes de mauvais départ de végétation sur betteraves en sol de limon. *Science sol*, 1, 61-66.

SABATON C., 1977. Sur l'optimisation d'un système d'observation — application à un réseau de contrôle de la pollution atmosphérique. *Cahiers de l'analyse des données*, 1, 79-96 ; 2, 173-192.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 11-1979

Dépôt légal : 4e trimestre 1979. N° d'impression : 26652

CPPAP n° 1426 ADEP

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1979	France Prix T.T.C.	Étranger Prix Net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix Net
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOLOGIE - ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	335 F	370 F	72 F	72 F

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 80 F — Étranger sauf R. F. A. : 130 F — Le numéro : France : 25 F — Étranger sauf R. F. A. : 40 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... **60,00 F**

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... **60,00 F**

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... **27,00 F**

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... **38,00 F**

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... **168,50 F**

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... **168,50 F**

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... **95,50 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... **63,50 F**

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... **134,50 F**

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... **173,00 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1979, **30** (3), 217-303.

Table des matières

Laurette COMBE. — Effet du gaz carbonique et de l'éclairement sur la croissance et la répartition des assimilats chez le Radis (*Raphanus sativus* L.) 217

Agnès HUBERT, R. CALVET. — Détermination du coefficient de diffusion moléculaire de solutés dans des milieux poreux saturés en eau 233

P. VACHIER, P. CAMBIER, R. PROST. — Structure d'un milieu poreux : la craie 247

Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Effets de quelques pesticides sur la minéralisation de l'azote organique du sol, la nitrification et la cellulolyse 265

A. P. CONESA, H. METTAUER, R. HAEFLINGER, R. TRENDEL, Y. TUAL, P. GROSS. — Etude de la productivité de l'agrosystème betteravier en Alsace. Essai d'établissement d'un modèle empirique prédictif 281

Contents

Laurette COMBE. — Growth and dry matter distribution responses of radish plants to different levels of irradiance and carbon dioxide concentration 217

Agnès HUBERT, R. CALVET. — The measurement of diffusion coefficients of solutes in porous media saturated with water 233

P. VACHIER, P. CAMBIER, R. PROST. — Structure of a porous medium : the chalk 247

Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Effects of pesticides on mineralization of soil organic nitrogen, nitrification and cellulose degradation 265

A. P. CONESA, H. METTAUER, R. HAEFLINGER, R. TRENDEL, Y. TUAL, P. GROSS. — Productivity of sugar beets in Alsace : a predicative model of the yields 281

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 9.036.003.5.

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 4

inra

AAG
30.4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 30 (4) 305-385 (1979)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris-Grignon, Paris Cedex 05.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie, Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1979, **30** (3), 305-322.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Arrière-effet des fumures azotées sur les bilans économique, énergétique et azoté des fumures des cultures ultérieures. Analyse théorique du problème et résultats expérimentaux

J. DECAU *, G. DUTHEN **, et B. PUJOL *

avec la collaboration technique de M. MONDIES * et de A. PACE *

* *Station d'Agronomie, Centre de Recherches de Toulouse, INRA, BP* 12, 31320 *Castanet Tolosan*
** *Compagnie Française de l'Azote (COFAZ), 4, Avenue Velasquez* 75008 *Paris*

Résumé

Il est tout d'abord rappelé les faits généraux suivants :

— les cultures fournissent très généralement des réponses moins que proportionnelles aux niveaux des facteurs de production auxquels elles sont soumises. Tel est le cas pour le facteur azote,

— les courbes de réponse (à l'azote) présentent plusieurs points remarquables, notamment ceux dont l'abscisse mesure le niveau à atteindre pour obtenir l'équilibre apport-exportation (Na) ou les doses nécessaires pour atteindre le meilleur bilan économique ou énergétique (Ne ou Nw),

— la pratique de la fertilisation azotée conduit à l'existence de reliquats d'azote non exporté par la culture,

— les reliquats peuvent évoluer suivant différentes voies et en particulier intervenir dans l'action du même facteur sur la culture qui suit et ainsi sur les abscisses des points remarquables de la courbe. En particulier un arrière-effet (N) positif entraînera simultanément un accroissement de la dose d'apport (fumure N) pour atteindre l'équilibre (Na) et une diminution des doses-seuils d'optimum économique (Ne) ou énergétique (Nw).

Il s'ensuit l'existence possible de 3 situations différentes :

Na > Ne : appauvrissement en azote (minéral) par le milieu,
Na = Ne : équilibre,
Na < Ne : enrichissement du milieu en N minéral.

Les réponses (à l'azote) de différentes cultures de blé illustrent bien l'analyse générale :

— on rencontre bien les 3 situations différentes envisagées,

— les relations entre les doses d'équilibre N et les doses-seuils des bilans économique et énergétique dépendent effectivement des reliquats d'azote antérieurs mais on note en outre une influence :

- des conditions climatiques (comme le montre la comparaison des résultats 1977 et 1978),
- des conditions pédologiques et culturales (qu'intègre la provenance géographique différente des résultats expérimentaux).

I. — Introduction

La pratique de la fertilisation azotée est généralement indispensable pour obtenir des cultures une utilisation optimale des potentialités du milieu. Mais la fumure azotée est coûteuse (financièrement et en énergie) et présente, outre le risque d'une utilisation très partielle, celui d'un stockage aléatoire dans le sol : le système sol-plante est, vis-à-vis de l'azote, un système ouvert qui peut bénéficier d'apports atmosphériques mais aussi subir des pertes qui créent des risques de pollution. Aussi, les agronomes et les praticiens se sont-ils efforcés d'adapter la fumure aussi étroitement que possible aux besoins des plantes durant leur cycle. De ce fait, les applications de fumure sont réalisées annuellement ou plus fréquemment encore, pour mieux répondre aux besoins de la plante en fonction de son cycle (cas des céréales et des fourrages, notamment).

Mais ces précautions n'excluent pas l'existence de reliquats d'azote des fumures qui peuvent manifester en partie leur arrière-effet au profit de la culture suivante.

Nous nous proposons ici de montrer tout d'abord, dans une analyse générale, le caractère inévitable de la présence de reliquats de fumure, et donc d'arrière-effets ; nous verrons ensuite les conséquences de certains d'entre eux (arrière-effet sur l'alimentation de la culture suivante) sur les besoins ultérieurs de fumure et, plus particulièrement, sur les doses-seuils qui permettent d'assurer l'équilibre des bilans économique, énergétique et azoté.

Nous illustrerons ensuite notre analyse par des résultats expérimentaux.

FIG. 1. — *Réponse d'une culture au facteur azote.*

A. Rendement.

B. Quantité d'azote exportée : (No : fourniture d'azote par le sol (hypothèse : arrière-effet faible) ; ΔN : fourniture supplémentaire d'azote par le sol (hypothèse : arrière-effet plus fort) ; Ro : rendement du témoin sans fumure (hypothèse : arrière-effet faible ; ΔR : différence de rendement du témoin entre des arrière-effets fort ou faible ; Δ : parallèle à l'axe des abscisses d'ordonnée Na ; Rm, Rw, Re : rendements maximal, au seuil énergétique, au seuil économique).

Na (= O'Na) (1) ou N'a (= O"N'a) (2) : fumure azotée assurant l'équilibre apport-exportation d'azote.

Nw (= O'Nw) (1) ou (= O"Nw) (2) : fumure azotée assurant le meilleur bilan énergétique.
Ne (= O'Ne) (1) ou (O"Ne) (2) : fumure azotée assurant le meilleur bilan économique.
Nm (= O'Nm) (1) ou (O"Nm) (2) : fumure azotée assurant le rendement maximal.

(1) : hypothèse arrière effet faible ; (2) hypothèse arrière effet plus fort.

Crop response to nitrogen factor.

A. Yield.

B. Exported Nitrogen Quantities : (No : supplies of N by the soil (low after-effect hypothesis) ; ΔN : increase in N supplies by the soil (higher after-effect hypothesis) ; Ro : yield obtained without N fertilizer (low after-effect hypothesis) ; ΔR : difference between the ON fertilizer yield obtained with low or high N after-effect ; Δ : parallel to x-axis (y = O'Na) ; Rm, Rw, Re : yields (maximum, for the best energetic and for economical balance).

Na (= O'Na) (1) ou N'a (= O"N'a) (2) : N fertilizer necessary for N fertilizer-exported N equilibrium.

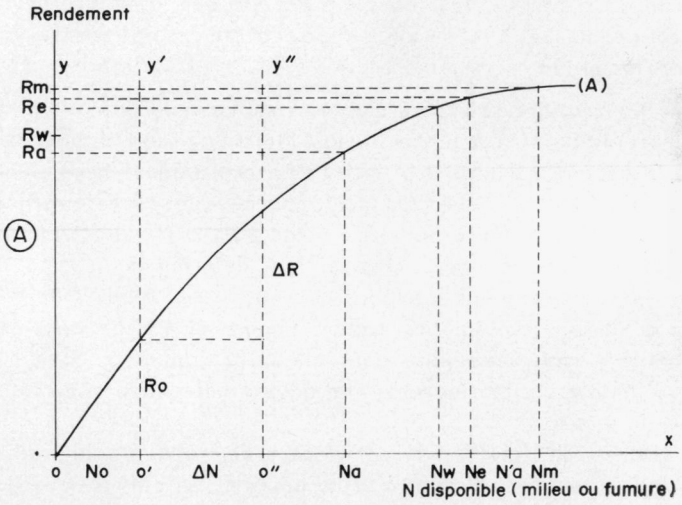
Nw (= O'Nw) (1) ou (= O"Nw) (2) : N fertilizer necessary for the best energetic balance.
Ne (= O'Ne) (1) ou (O"Ne) (2) : N fertilizer necessary for the best economical balance.
Nm (= O'Nm) (1) ou (O"Nm) (2) : N fertilizer necessary for maximum yield.

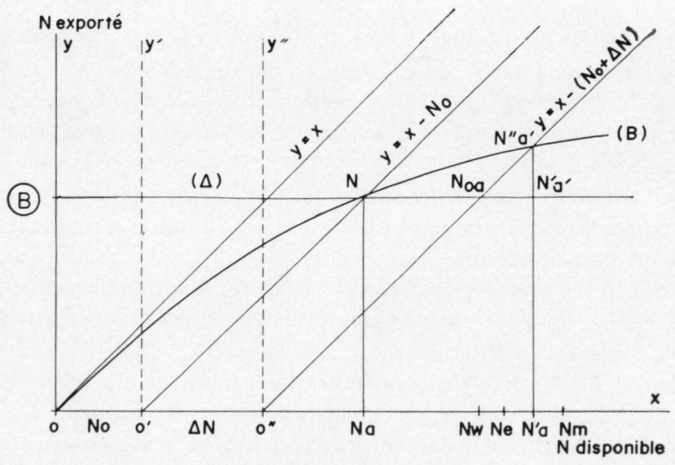
(1) : low after-effect hypothesis (2) : higher after-effect hypothesis.

II. — Analyse du problème : les reliquats d'azote et leurs effets sur les fumures ultérieures

A. — *Existence de reliquats d'azote des fumures*

Lorsqu'une culture est soumise à des apports croissants d'un facteur de production, les autres facteurs n'étant pas limitants, on observe que les accroissements de production sont très généralement moins que proportionnels à l'augmentation des apports. Ce phénomène a été particulièrement étudié par Mitscherlich (Demolon, 1956) et comme lui, par bien des agronomes. Il se vérifie notamment pour le facteur azote. La relation $R = f(N)$ peut donc être représentée par une courbe du type de celle de la figure 1A, la courbe (A) par exemple.





Dans les mêmes conditions, la quantité du facteur retrouvée dans la production croît avec les apports selon une loi différente qui fait cependant apparaître très généralement des exportations d'azote inférieures aux apports (fig. 1B, courbe (B)).

Dans les conditions agricoles, les courbes expérimentales observées diffèrent des courbes théoriques par leur ordonnée à l'origine positive. Ainsi, dans le cas de l'azote, le milieu contribuant à l'alimentation des cultures en cet élément, les courbes expérimentales seront limitées à une zone de la figure, $xO'y'$ ou $xO''y''$ par exemple, selon que le milieu fournit à la culture une quantité d'azote faible ou élevée.

Considérons la courbe de la figure 1A comprise dans l'espace $xO'y'$. Elle présente plusieurs points particuliers importants :

— l'ordonnée Ro qui mesure le rendement obtenu en l'absence de fumure,

— le niveau maximal de production Rm et la fumure Nm à mettre en œuvre pour l'atteindre, mais aussi :

— les niveaux optimaux de production Re, Ra, que la culture peut fournir sans que deviennent négatifs les bilans économique et azoté des apports d'engrais effectués (et les fumures Ne et Na correspondantes).

De même pourra être considéré comme remarquable l'apport d'azote Nw qui assure l'équilibre du bilan énergétique de la culture ; on pourra juger celui-ci atteint, par exemple, lorsque la valeur énergétique de l'accroissement de rendement en grain cesse d'être supérieure à l'investissement énergétique nécessaire pour l'obtenir, investissement dans lequel entre pour une large part le facteur azote.

Trois seuils de fumure pourront ainsi être déterminés.

Les doses nécessaires pour atteindre chacun de ces seuils diffèreront selon la culture et les conditions écologiques, technologiques et économiques. Ainsi, notamment, la quantité d'azote nécessaire pour atteindre l'optimum économique pourra être supérieure, égale ou inférieure à celle qui est nécessaire pour compenser l'exportation par la récolte.

Dans le premier cas ($Ne > Na$), si l'on cherche à atteindre le seuil économique, il subsistera dans le milieu un excès d'azote apporté qui pourra évoluer suivant les diverses voies du cycle de l'azote.

Dans le second cas ($Ne = Na$), nous rencontrerons la situation idéale d'équilibre.

Dans le troisième, enfin, ($Ne < Na$), la fumure apportée ne suffira pas à compenser les exportations d'azote. La culture exploitera des réserves du sol, minérales ou organiques ; elle pourra ainsi, dans certains cas, avoir une action dépolluante.

La prise en compte, en outre, d'un seuil énergétique peut accroître encore le nombre de cas de figures.

Toutefois, la situation la plus fréquente sera la première, dans laquelle la quantité d'azote à apporter pour atteindre l'optimum économique sera supérieure à celle que nécessite l'équilibre azoté.

Considérons la fertilisation azotée d'une céréale, d'un blé par exemple : le seuil de rentabilité économique sera atteint sensiblement, lorsque l'accroissement du rendement en grain cessera d'être supérieur à 4 kg par kg d'azote apporté (au cours actuel, il faudrait 2 à 3 kg de blé aux normes (selon la forme d'azote et le type de blé) pour payer 1 kg d'azote épandu ; on a retenu le rapport 4 kg de grain sec/1 kg N pour imputer une partie de l'ensemble des frais culturaux au supplément de produit obtenu.)

Dans ces conditions, à ce niveau de productivité limité, la céréale exporte environ $4 \times 0{,}02 = 0{,}08$ kg d'azote par kg d'azote apporté (dans l'hypothèse d'une teneur du grain de 2 p. 100), d'où un bilan apport-exportation très nettement positif. Le seuil d'équilibre azoté sera donc souvent obtenu pour un apport d'azote beaucoup plus faible que l'optimum économique. C'est notamment ce qu'illustrent certains de nos résultats obtenus dans les conditions du Sud-Ouest de la France (Decau *et al.* 1977).

Quoi qu'il en soit, la fumure optimale d'un point de vue économique exigera souvent l'application de doses d'élément qui excèdent de beaucoup les exportations d'où des reliquats d'azote qui peuvent produire des arrière-effets divers.

La prise en compte de données énergétiques (Hutter, 1976) conduit à des résultats identiques, les seuils énergétique et économique étant actuellement atteints, pour le blé, sensiblement pour le même rapport $\Delta R/\Delta N = 4$.

B. — *Devenir des excédents d'azote*

Une part de l'azote apporté par la fumure, lors d'applications croissantes, contribue à l'enrichissement en azote des organes végétatifs. L'azote ainsi temporairement bloqué peut contribuer à la formation d'humus ou retourner plus ou moins vite dans le pool de l'azote minéral du sol.

Une part de l'azote apporté en excès pourra ainsi subsister dans le sol sous forme minérale, en l'absence de drainage, jusqu'au cycle cultural suivant tandis qu'une autre sera stockée sous forme organique (réorganisation, humification) et libérée au moins en partie pour la culture qui suit. Ce dernier phénomène a été particulièrement étudié dans le cas des pailles de céréales, par exemple (Simon-Sylvestre, 1960 ; Graffin, 1971). Ainsi, Graffin a montré, dans des essais de laboratoire, que la réorganisation affecte temporairement environ 10 kg d'azote par tonne de paille ; l'azote ainsi organisé minéralise toutefois rapidement.

Enfin, une part de l'azote en excès pourra être perdue par le milieu par lessivage (Soubiès *et al.*, 1952 ; Dowdell et Webster, 1976 ; Simpson et Freney, 1974), volatilisation (Fenn et Kissel, 1975 ; Avnimelech et Raveh, 1976 ; Matocha, 1976 ; Fenn et Escarzaga, 1976) ou dénitrification (Stefanson, 1975).

C. — *Participation de l'azote en excès à l'alimentation de la culture suivante et modification des seuils de réponse à la fumure*

Si une part de la fumure azotée d'une culture devient plus ou moins directement disponible pour la culture qui suit, il en résultera une modification des niveaux de fumure permettant d'atteindre, d'une part, l'équilibre azoté, d'autre part, les équilibres économique et énergétique. En effet, considérons les deux situations théoriques de la figure 1 :

— dans le cas d'un arrière-effet faible (rendement Ro du témoin sans azote), la fumure à apporter pour atteindre les seuils de rentabilité économique et énergétique est mesurée respectivement par les segments O′Ne et O′Nw de la figure. Dans le même temps, la quantité de l'azote de la fumure nécessaire pour atteindre l'équilibre apport-exportation est représentée par le segment O′Na (fig. 1B) et l'on observe les inégalités $O'Ne > O'Na$ et $O'Nw > O'Na$.

— si le reliquat d'azote intervenant dans l'alimentation azotée de la culture ultérieure croît (accroissement ΔN entraînant une augmentation ΔR du rendement des parcelles non fertilisées ; fig. 1A), il s'ensuit, *dans l'hypothèse où les courbes générales de réponse à l'azote (courbes A et B) ne sont pas modifiées par le phénomène*, une diminution ΔN des doses d'azote permettant d'atteindre le seuil de rentabilité économique et énergétique ; celles-ci sont alors représentées par les segments $O''Ne$ et $O''Nw$. A l'inverse, l'accroissement ΔN de l'arrière-effet azote augmente la dose de fumure nécessaire pour atteindre l'équilibre azoté ; cette quantité est mesurée par le segment $O''N'a > O'Na$ (fig. 1B) et on peut observer que cet accroissement est représenté par le segment $NoaN'a' = N'a'N''a'$ qui mesure l'augmentation d'exportation d'azote au nouveau niveau d'équilibre azoté $N'a$. L'étude des relations entre les différentes doses-seuils étudiées fait alors apparaître que $O''N'a > O''Ne$ et $O''N'a > O''Nw$.

Ainsi donc, selon l'importance des arrière-effets azote, nous pourrons théoriquement observer une des situations suivantes : $Ne > Na$; $Ne < Na$; ou encore $Ne = Na$. Selon l'arrière-effet, les seuils considérés pourront donc être modifiés dans un sens favorable ou défavorable à l'économie de la fumure.

III. — Etude de données expérimentales observées

De nombreuses observations expérimentales permettent d'illustrer et de vérifier notre analyse ; un grand nombre d'entre elles concernent les céréales et en particulier les blés que nous prendrons seuls ici comme exemples.

Nous décrirons pour cela tout d'abord un essai réalisé à la Station d'agronomie de Toulouse et dans lequel les conditions climatiques et culturales ont été suivies de manière précise et certains éléments du bilan azoté exactement mesurés durant 2 années culturales successives (rotation maïs-blé, années 1977 et 1978) ; le suivi expérimental a permis de déterminer l'arrière-effet azote exercé par le précédent selon la fertilisation (maïs différemment fertilisés ou sol nu) sur les réponses d'un blé à l'azote et sur les diverses doses-seuils des fumures ultérieurement appliquées.

Par ailleurs, la réponse des blés à la fertilisation azotée a été étudiée en 1977 et 1978 dans de très nombreux essais annuels réalisés dans diverses grandes régions agricoles de la France (par la COFAZ, notamment). Le blé a été ainsi placé dans des conditions pédo-climatiques et culturales différentes susceptibles d'engendrer des arrière-effets eux-mêmes différents. Nous évaluerons l'arrière-effet global azote (par la mesure du rendement des parcelles non fertilisées) et montrerons ses conséquences sur les niveaux respectifs des doses d'azote nécessaires pour atteindre, d'une part, l'équilibre du bilan azoté, d'autre part, la limite de rentabilité de la fumure.

A. — *Conditions expérimentales*

1. Sur le dispositif expérimental de la Station d'agronomie de Toulouse, un maïs a été cultivé au champ, en 1977, en milieu argilo-calcaire, en alimentations hydrique et phospho-potassique non limitantes. Il a été soumis à des fertilisations azotées de deux niveaux différents, destinées à encadrer soit par défaut, soit par excès, la fertilisation optimale : 150 kg ou 300 kg N/ha ont été apportés avant semis sous forme

d'ammonitrate. Un apport supplémentaire de cent unités d'azote a été effectué, après semis, sur les seules parcelles recevant la forte fumure, compte tenu des conditions pluviothermiques très défavorables à l'utilisation de l'azote en début de végétation.

A côté des zones cultivées, une zone a été maintenue sans végétation ni fumure azotée.

Les rendements du maïs ont été mesurés et l'absorption d'azote par le grain et les organes végétatifs a été déterminée.

En 1978, un blé dur (variété Durtal) a été cultivé sur l'ensemble des trois zones. Dans les parcelles antérieurement en maïs, le blé a été soumis à des fumures azotées différentes (0, 70, 140 ou 210 kg N/ha sous forme d'ammonitrate 33,5 p. 100 apportés pour les deux tiers avant tallage, un tiers en début de montaison). Sur les parcelles antérieurement sans culture ni fumure, le blé n'a pas reçu de fertilisation azotée.

A la récolte, on a mesuré les rendements en grain et les quantités d'azote exportées par le blé.

2. Dans différentes régions de France (Bassin parisien, Massif Central, Sud-Ouest, etc...), les blés ont fait l'objet de nombreux essais de fertilisation azotée. Les cultures ont été soumises à des apports nuls (témoins) ou croissant en progression arithmétique jusqu'au-delà de la fertilisation assurant le rendement maximum. Les réponses à l'azote ont été mesurées par l'organisme expérimentateur (COFAZ) : les rendements et la teneur des grains en azote ont été déterminés. Toutefois, dans quelques cas, nous avons calculé les teneurs des grains en azote par interpolation à partir des résultats analytiques acquis ; dans tous les cas, l'exportation d'azote par le grain a été évaluée.

Dans l'un et l'autre cas, la quantité d'azote restant dans le sol en fin de culture de blé n'a pas été déterminée, le végétal seul étant analysé.

B. — *Résultats*

1. — *Réponse du blé dur après un précédent diversement fertilisé (essai de la Station d'agronomie de Toulouse).*

En l'absence de fertilisation azotée (en 1978), le rendement en grain a été en moyenne de 4,3 q/ha dans les zones non cultivées en 1977, de 11,3 q/ha sur les parcelles ayant reçu 150 kg N/ha avant maïs et de 18,6 q/ha après maïs surfertilisé.

Ces données doivent être rapprochées des reliquats estimés laissés par les situations antérieures et pour lesquelles le bilan s'établit comme suit (tableau 1).

Il apparaît ainsi que l'effet de l'azote non utilisé par le maïs n'est pas proportionnel à la masse des reliquats potentiels calculés. Ceci résulte de ce que les reliquats réels ont différé très largement des reliquats potentiels. L'écart provient probablement pour une large part des conditions climatiques particulières qui ont agi sur la dynamique de l'azote après l'apport de la fumure du maïs. En effet, les pluies l'ont emporté très nettement sur l'évapotranspiration de la culture, provoquant probablement un très important lessivage de l'azote ; les pluies ont atteint, dès le mois de mai 1977, 235 mm ; on peut en attendre une descente moyenne des nitrates apportés de l'ordre de 80 cm à partir de la surface du sol (Gadet et Soubiès, 1962), puis durant l'hiver et le printemps 1978, l'excès des pluies sur l'évapotranspiration réelle a dépassé 300 mm d'où un entraînement inévitable d'une grande partie de l'azote minéral du

TABLEAU 1

Bilan de l'azote apporté
Balance of the supplied nitrogen

Culture 1977	Néant	Maïs	Maïs
Fumure apportée (N kg/ha)	0	150	400
Exportation d'azote :			
— par le grain	0	114,5	132,6
— par les tiges et les rafles (1)	0	17,0	25,8
— totale	0	131,5	158,4
Reliquats potentiels N (N kg/ha)	0	+ 18,5	+ 241,6
Culture 1978	Blé dur	Blé dur	Blé dur
Fumure apportée (N kg/ha)	0	0	0
Rendement (q/ha)	4,3	11,3	18,6

(1) 50 p. 100 de la masse des organes végétatifs du maïs, utilisée au cours de l'expérimentation pour la mesure de la production, n'a pas été rapportée au champ.

milieu hors de portée des racines du blé. Cependant, il subsiste un effet résiduel de la fumure du maïs, faible mais non nul, et qui a beaucoup modifié la réponse à l'azote du blé qui lui a succédé.

En présence de fertilisations azotées croissantes : La faible fertilisation antérieure (150 kg N/ha) conduit à observer des rendements croissant dans toute la gamme des fumures et atteignant 30 q/ha (fig. 2, courbe 1A).

Au contraire, le rendement maximum obtenu après surfertilisation du maïs plafonne au même niveau dès la troisième dose de la fumure (140 kg N) (fig. 2, courbe 2A).

Les courbes d'absorption d'azote, dans les deux situations considérées, sont, de même, très différentes.

L'étude comparée des seuils d'équilibre économique, énergétique et azoté de la culture confirme l'analyse initiale : le niveau de la fumure assurant l'équilibre du bilan azoté est relevé de 26 à 45 kg N/ha en raison de l'influence positive du reliquat d'azote (fig. 2B). Au contraire, les niveaux de fumure qui permettent d'atteindre les seuils économique et énergétique se trouvent très nettement abaissés (de 214 kg N/ha à 128 kg N/ha). Il n'en résulte cependant pas une inversion des niveaux relatifs des différents équilibres, les conditions climatiques durant les deux années de culture n'ayant pas permis à l'arrière-effet des fumures de se manifester pleinement.

Dans cet exemple, la fumure économique, même en présence d'arrière-effet, reste donc supérieure à la fumure d'équilibre azoté. Mais ceci ne représente pas le cas général, ce que va montrer l'analyse d'un grand nombre de situations expérimentales.

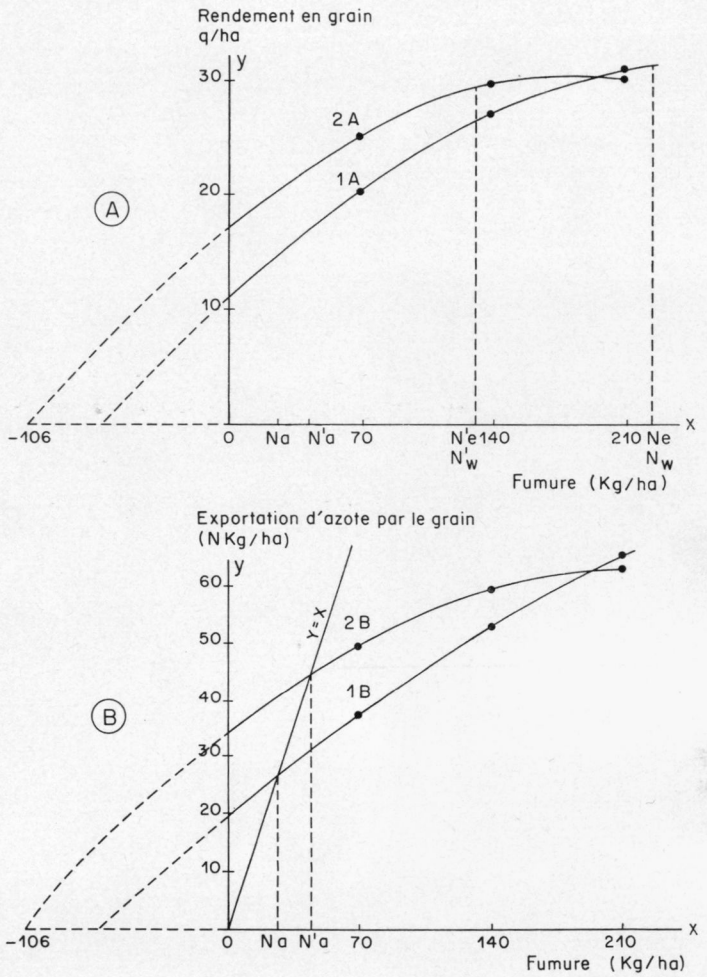


FIG. 2. — *Réponse à la fumure azotée d'un blé dur après maïs différemment fertilisés (signification des sigles : voir légende fig.* 1).

(Fumure antérieure limitée 1 A, 1 B ou excédentaire 2 A, 2 B.)

A. Rendement en grain.

B. Exportation d'azote par le grain.

Response to N fertilizer of Wheat (Triticum Durum L.) following differently fertilized Maizes (Initials : see fig. 1).

(Previous N fertilizer restricted 1 A, 1 B or in excess 2 A, 2 B).

A : Grain yield.

B : Nitrogen exported by grain.

2. — *Extension des résultats* : cas de blés cultivés durant des années climatiques différentes et dans diverses régions céréalières de France (essais COFAZ).

Les résultats montrent (fig. 3A et 3B) que l'on peut effectivement observer les trois situations théoriques décrites plus haut : les doses d'azote à apporter pour

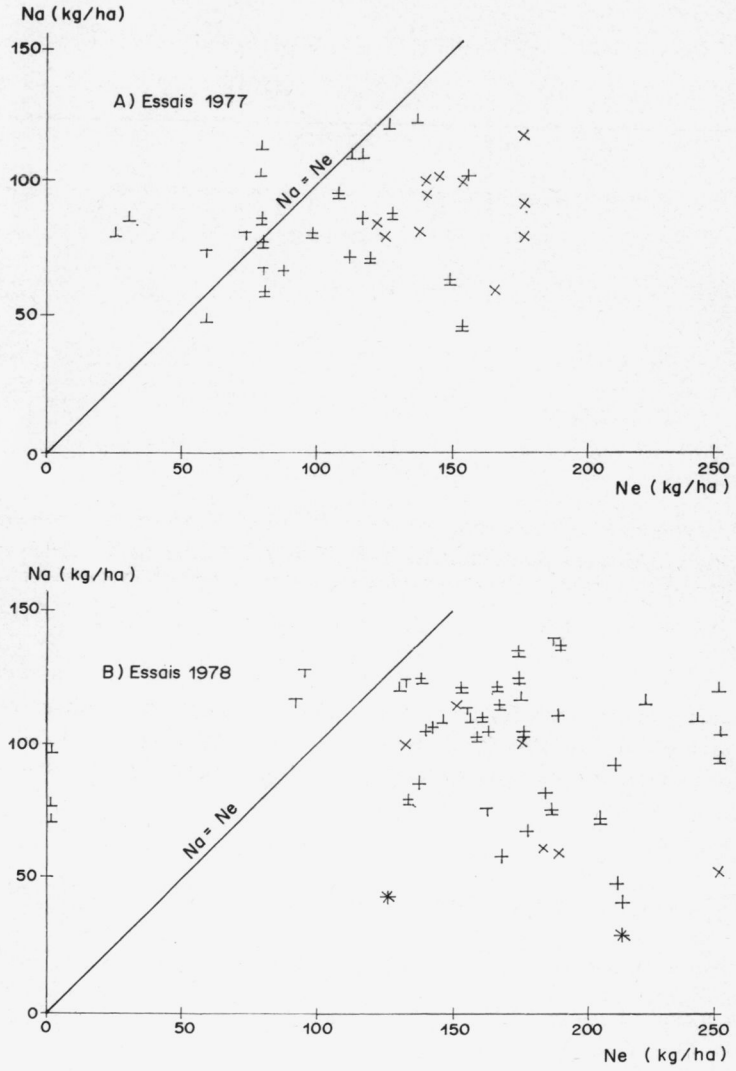


FIG. 3. — *Relation entre les niveaux de fumure assurant l'équilibre du bilan azoté (Na) ou le meilleur bilan économique (Ne).*

(Zones d'implantation des essais : ⊥ : Bassin Parisien (Centre et Nord) ; ± : Bassin Parisien (zones périphériques) ; T : Massif Central (Limagne) ; ×, ∗ : Sud-Ouest (∗ essai réalisé à la Station d'agronomie de Toulouse) ; + : autres régions).

A. Essais 1977.

B. Essais 1978.

Relation between fertilizer nitrogen amounts necessary for the fertilizer N supply-exported N equilibrium (Na) or for the best economic level (Ne).

A : 1977 experimental data.

B : 1978 experimental data.

atteindre l'équilibre azoté peuvent être en effet supérieures, égales ou inférieures à celles qui assurent l'optimum économique.

La première situation (Na > Ne) a été observée en 1977 dans sept essais sur trente-six étudiés. Parmi ces essais figurent essentiellement ceux réalisés sur des sols de limons de la Région parisienne (fig. 3A). Ceci résulte du fait que, dans ces terres fertilisées depuis longtemps, les arrière-effets sont tels que l'optimum économique pour des rendements élevés, et donc de fortes exportations, est relativement bas.

Au voisinage de la situation d'équilibre se placent encore des essais de la Région parisienne et de Limagne tandis que nous voyons parmi les situations les moins favorables (Ne ⩾ Na) quelques situations à faible potentialité des confins du Bassin Parisien et de nombreux cas du Sud-Ouest. Toutefois, l'examen d'un plus grand nombre de situations, dans le Sud-Ouest, montre que l'on rencontre aussi, dans cette région les trois types de situations décrites ; le premier cas se rencontre encore lorsqu'il existe un arrière-effet important des fumures antérieures ou d'une fertilité acquise élevée mais plus souvent encore lors d'absence ou de quasi-absence de réaction à la fumure (Ne faible) par suite d'attaques parasitaires (Nolot, I.T.C.F., 1978).

L'examen comparé des résultats obtenus en 1977 et en 1978 (quarante-huit essais examinés en 1978) montre l'influence du climat de l'année de culture. En 1978, le nombre de cas du premier type (Na > Ne) demeure voisin de celui de 1977, quoique un peu plus faible en valeur relative (cinq sur quarante-huit) ; il intéresse encore notamment quelques essais sur milieux très aptes à céder de l'azote à la culture (Limagne) et dont certains ne réagissent pas à la fumure. Mais, à l'opposé figurent surtout, assez loin de l'équilibre Na = Ne, certains essais de la Région Parisienne et du Sud-Ouest de la France, ceux-ci différant toutefois des premiers par le niveau plus faible des doses d'azote qui assurent l'équilibre azoté ; la situation ainsi rencontrée est alors la plus éloignée de l'équilibre.

Les résultats montrent donc un net accroissement d'ensemble du déséquilibre Ne-Na en 1978 par rapport à 1977. Ceci s'explique probablement par des différences climatiques et par leur influence sur le niveau des reliquats : durant l'hiver 1977-1978, les pluies ont entraîné un drainage beaucoup plus intense qu'en 1976-1977, d'où l'existence de reliquats d'azote, et donc d'arrière-effets N, beaucoup plus faibles.

Ces résultats, comme ceux qui ont été observés dans l'essai réalisé à la Station d'Agronomie de Toulouse, illustrent donc encore l'action différée de l'azote sur les niveaux seuils des fumures ultérieures.

IV. — Discussion

A partir de l'essai suivi à la Station d'Agronomie de Toulouse, nous examinerons comment la préhension de l'arrière-effet N peut modifier l'évaluation de l'efficacité des fumures antérieurement appliquées.

Puis, à partir de l'ensemble des essais, et bien que nous ne connaissions pas toujours parfaitement l'histoire culturale des milieux étudiés, nous discuterons certains éléments de notre analyse.

A. — *Arrière-effet et efficacité de l'azote des fumures*

Examinons les réponses à l'azote observées successivement en 1977 et 1978 dans l'essai maïs-blé réalisé à la Station d'Agronomie de Toulouse.

Nous pouvons observer que la prise en compte de l'arrière-effet N modifie radicalement l'évaluation de l'efficacité de la fumure antérieure (ici la fumure N du maïs) : en 1977, nous avons observé un accroissement de rendement de 4 q/ha de grains de maïs entre les fumures de 150 et 400 kg N/ha et une augmentation d'exportation d'azote de 18,1 kg (sous forme de grains). Dans cet intervalle, chaque kilogramme d'azote de la fumure a donc, en moyenne, produit 1,6 kg de grains de maïs et a accru les exportations de 0,08 kg N sous forme de grains, valeurs extrêmement faibles qu'explique la combinaison d'effets positifs et dépressifs du large supplément de fumure mis en jeu.

Mais en revanche, si nous tenons compte de l'arrière-effet azote sur le blé dur qui a succédé au maïs, nous notons, dans les cultures témoins, un supplément de production de 7,3 q/ha de grains et une exportation d'azote accrue de 15 kg/ha, ce qui augmente nettement les efficacités calculées.

L'effet bénéfique du reliquat d'azote est encore plus net si l'on considère l'abaissement du niveau de la fumure qu'il convient d'apporter sur la culture suivante pour atteindre le seuil de rentabilité économique et énergétique de production (fig. 2A) ; toutefois, de meilleurs résultats auraient pu être observés en année climatique plus favorable et avec une culture plus productive.

B. — *Effet de l'azote provenant des fumures antérieures ou du milieu sur les relations entre les grandeurs Na et Ne*

Nous avons signalé plus haut qu'un arrière-effet azote croissant ($+ \Delta N$) doit entraîner selon notre analyse théorique à la fois une diminution ($- \Delta N$) de la dose de fumure à apporter pour atteindre le seuil économique (Ne) et un accroissement corrélatif de la dose nécessaire à l'équilibre azoté Na.

Nos résultats expérimentaux (Station d'Agronomie de Toulouse) montrent que les différences d'arrière-effet modifient les seuils dans le sens prévu: toutefois les variations observées diffèrent en moyenne de celles qui découleraient de l'hypothèse avancée plus haut (cf. p. 6) selon laquelle l'importance du reliquat ne modifierait pas la courbe de réponse à l'azote (cf. fig. 1A). En effet, pour la variation observée ΔN ($\Delta N = 40$ kg N/ha), on note un accroissement de Na de 19 unités, mais un abaissement de Ne de 86 kg/ha (fig. 2A).

Ces résultats ébranlent en partie l'hypothèse initiale d'unicité de la réponse de la culture *au niveau d'azote théoriquement disponible* (N provenant du sol + N de la fumure), sans toutefois modifier le sens de variation des rapports entre les différents seuils.

Afin de mieux tester cette hypothèse, à partir des courbes expérimentales de la figure 2, qui représentent les réponses des cultures *aux quantités d'azote de la fumure*, nous avons construit les courbes correspondantes : rendement et azote exporté en fonction de l'azote estimé disponible (fig. 4).

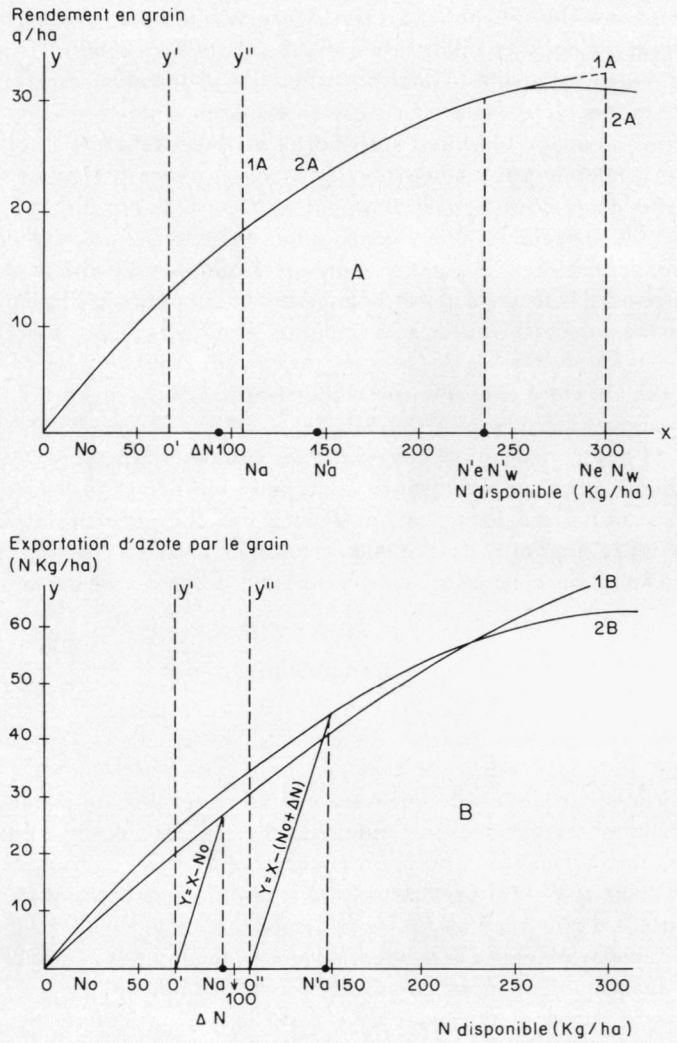


FIG. 4. — *Réponse des blés au facteur azote selon l'arrière-effet de cet élément.*
(Fumure antérieure limitée 1 A, 1 B ou excédentaire 2 A, 2 B).
A. Rendement en grain.
B. Exportation d'azote par le grain.

Wheat response to nitrogen according to N after-effect.
(Previous N fertilizer restricted 1 A, 1 B or in excess 2 A, 2 B).
A : Grain yield.
B : Nitrogen exported by grain.

Les données montrent que, dans nos conditions expérimentales, l'hypothèse d'une même courbe de réponse est valable pour une large gamme de niveaux d'azote dans le cas du rendement en grain : rapportées à la même origine (azote disponible nul), les deux courbes sont en effet confondues sur une large plage de niveaux d'azote

disponible. En revanche, l'hypothèse cesse d'être vérifiée aux forts niveaux d'azote et l'écart est plus net dans les relation N exporté = f (N disponible).

Dans les autres cas étudiés, l'analyse de l'influence de l'effet résiduel azote sur les niveaux des fumures Na et Ne a été réalisé en évaluant, d'une part, les niveaux relatifs Na et Ne par le rapport Na/Ne, d'autre part, l'arrière-effet azote d'après la quantité contenue dans le témoin sans fumure (Nt) (fig. 5). Nous avons préféré cette expression de l'arrière-effet azote à son appréciation par la mesure de No (fig 2).

En effet, celle-ci résulte d'une extrapolation des courbes expérimentales et non d'une détermination directe et concrète comme la quantité d'azote contenue dans la récolte. D'autre part, l'efficacité de No, comme celui des apports d'azote par la fumure peut être affectée par différents facteurs limitants, état hydrique du sol, état structural qui rendent les relations Na/Ne = f (No) moins étroites. Toutefois, les deux grandeurs Nt et No présentent entre elles une corrélation positive.

Les résultats montrent (fig. 5A et B) qu'il existe, pour l'ensemble des données, une corrélation hautement significative entre les grandeurs étudiées.

Mais il existe aussi un effet année climatique lui-même hautement significatif. Cet effet se traduit par des pentes très différentes des deux courbes observées. Ainsi, en 1977, l'équilibre Na/Ne = 1 est atteint lorsque le témoin renferme 55 kg N/ha ; en 1978, cette situation n'est observée que lorsque le témoin renferme 80 kg N/ha.

V. — Conclusions

Après une analyse théorique de l'influence différée de la fertilisation azotée, nous avons pu vérifier, à partir de diverses données expérimentales, l'effet très net des reliquats d'azote (reliquats de fumure ou azote minéralisé au profit de la culture suivante) sur les doses critiques des fumures ultérieures : doses d'équilibre azoté (Na) ou optimums économique ou énergétique (Ne ou Nw) ; on observe ainsi que l'arrière-effet azote relève les premières (Na) et abaisse les secondes (Ne ou Nw), ce qui tend à réduire, sinon à annuler, l'excès d'apport d'azote sur les cultures.

Mais les données obtenues dépendent aussi étroitement des conditions de l'année climatique et de la situation pédologique et culturale des milieux.

Si donc notre approche théorique trouve, sur le terrain, des vérifications expérimentales, il convient d'en nuancer les conclusions. En particulier, l'analyse, fondée sur des bilans, ne tient pas compte des besoins instantanés des cultures qui peuvent excéder temporairement la disponibilité d'azote de l'ensemble milieu-fertilisant.

D'autre part, il n'est pas tenu compte des modalités d'apport des fertilisations appliquées, de leur fractionnement au cours du temps, modalités qui peuvent modifier à la fois l'efficience de l'azote et les quantités absorbées.

Ces différents résultats nous amènent donc, en définitive, à confirmer si besoin était, que la fertilisation azotée, technique qu'il convient d'adapter d'aussi près que possible aux besoins immédiats des cultures, doit être conçue et établie en tenant compte d'une part, de l'histoire culturale de la parcelle, de sa succession de cultures, de la politique antérieure de fertilisation et de ses effets, d'autre part, des effets propres de la fumure apportée, selon les conditions pédo-climatiques des milieux ; celles-ci en outre, déterminent dans une large mesure, l'aptitude du végétal à utiliser l'azote et à orienter en sa faveur la dynamique de l'élément.

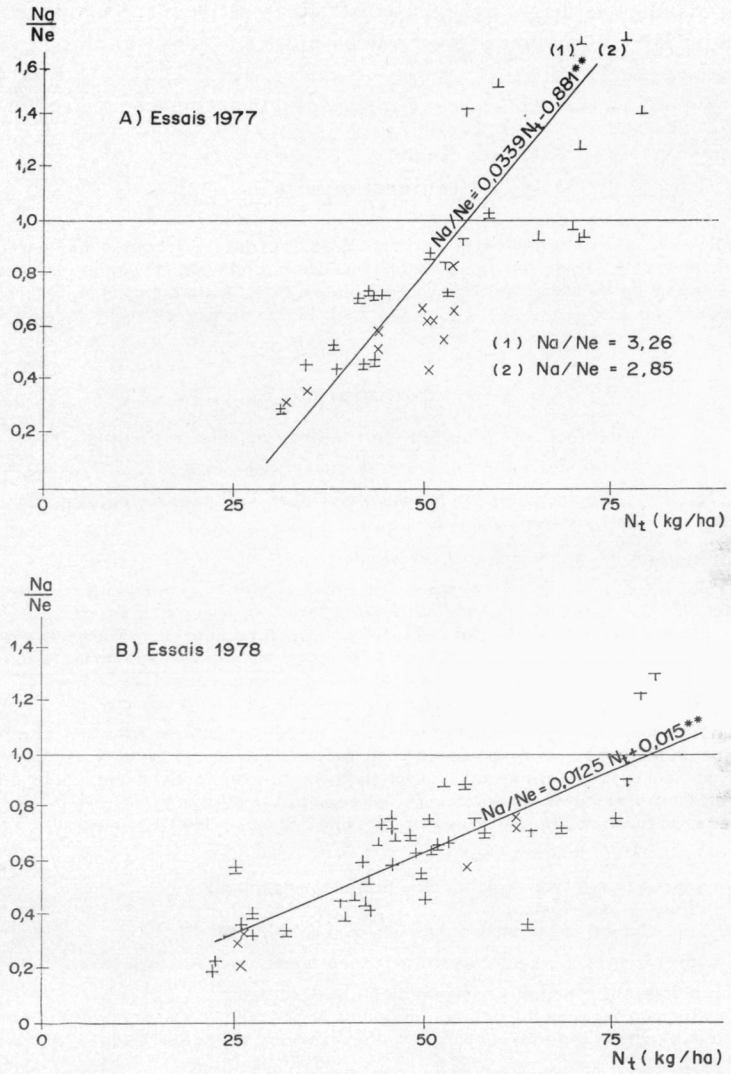


FIG. 5. — *Influence de l'arrière-effet N sur les niveaux relatifs des équilibres azotés (Na) et économiques (Ne).*
(Nt : quantité d'azote (kg/ha) absorbée par les cultures témoins. Zones d'implantation des essais : voir fig. 3).
A. Essais 1977.
B. Essais 1978.

Influence of the nitrogen after-effects on the Na and Ne amounts.
(Nt : N (kg/ha) absorbed by ON fertilizer crops).
A : 1977 experimental data.
B : 1978 experimental data.

Ceci fait donc apparaître comme très utile tout effort entrepris afin d'évaluer les arrière-effets possibles de l'azote (Rémy et Hébert, 1977) ; ces résultats confirment en effet la nécessité d'études nouvelles pour mieux connaître l'évolution de l'azote dans

le sol, appréhender les divers devenirs possibles de cet élément selon les conditions pédoclimatiques et ainsi mieux prévoir, mieux ajuster la fertilisation aux besoins des cultures.

Reçu pour publication en septembre 1979.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages et tout particulièrement M. J. M. Nolot (I. T. C. F., Toulouse) pour les informations qui leur ont été communiquées. Ils remercient aussi très vivement M. Hébert (Station d'agronomie I. N. R. A. de Laon) et M. Sebillotte (Chaire d'agronomie de l'I. N. A. P. G.), lecteurs du projet, pour l'apport très constructif de leurs remarques.

Summary

After-effect of nitrogen fertilizers on the economic, energetic and nitrogen balance of subsequent crops fertilization. Theoretical analysis of the problem and observed experimental data.

The following general points are first reviewed :

— as a rule, crops give less than proportional answers to the production-factor levels to which they are subjected. Such is the case for the nitrogen factor,

— the nitrogen response curves show several noteworthy features, more particularly those in which the abscissa indicates the level required to reach the supply-exportation balance (Na) or the application rates allowing the best economic or energetic evaluation (Ne or Nw),

— nitrogen fertilizing conduces to nitrogen residues the crops did not use.

These residues may develop in different ways and, more particularly, take effect on the action of the same factor on the subsequent crop and, hence, on the abscissae of the noteworthy points on the curve. More particularly, a positive after-effect (N) will concomitantly bring about an increased application rate (fertilizer N) in order to reach the equilibrium (Na), and a decrease of the amounts of fertilizer required for the optimally economic (Ne) and energetic (Nw) minimum.

It may bring in three different conditions :

Na > Ne : nitrogen mineral depletion due to the environment.
Na = Ne : state of equilibrium.
Na < Ne : enrichment of the environment in mineral N.

The responses of various wheat crops to nitrogen agree well with the overall analysis :

— the three different conditions contemplated are observed ;

— the relationship between the balanced amounts N and the minimum amounts of the economic and energetic evaluations actually depend on the previous nitrogen residues, but also noted is the influence of :

i) the weather (as showed by the comparison between 1977 and 1978 results),

ii) the pedological and crop conditions (which the different geographical origins of the experimental results take into account).

Zusammenfassung

Nachwirkung der Stickstoffdüngungen auf die Wirtschafts-, Energie- und Stickstoffbilanzen der Dungungen der nachfolgenden Kulturen. Theoretische Analyse des Problems und experimental festgestellte Daten.

Es wird zuerst die folgenden allgemeinen Tatsachen erwähnt :

— die Kulturen liefern meistens minderverhältnismässige Aussagen auf der Ebene der Ertragsfaktoren, welchen dieselben unterworfen sind. Dies ist der Fall für den Stickstoffaktor,

— die Aussagekurven (des Stickstoffs) zeigen mehrere bemerkenswerte Punkte, besonders jene,

deren Abszisse die nötige Höhe angibt um das Gleichgewicht zwischen Angebot und Abfuhr (Na) oder die notwendigen Mengen um die beste Wirtschafts oder Energiebilanz zu erreichen (Ne oder Nw),

— die Praxis der azotierten Fruchtbachmachung, führt zum Vorhandensein von der Kultur nicht abgeführte Stickstoff = restbestände,

— die Restbestände können sich auf verschiedene Weise entwickeln und besonders in die Wirkung des gleichen Faktors der nachfolgenden Kultur eingreifen und somit auch auf die Abszisse der bemerkenswerten Punkte der Kurve. Im Besonderen wird eine positive Nachwirkung (N) gleichzeitig eine Zunahme der Angebotsdosis (Düngung N) zur Folge haben, um das Gleichgewicht (Na) und eine Abnahme der Grenzdosen des Wirtschafts oder Energieoptimums (Ne oder Nw) zu erreichen.

Es folgt daraus die Möglichkeit des Vorhandenseins drei verschiedener Verhältnisse :

Na > Ne : Stickstoffverlust (mineralisch) durch das Medium,
Na = Ne : Gleichgewicht,
Na < Ne : Anreicherung des Mediums an mineralischem N.

Die Aussagen (an Stickstoff) verschiedener Weigenekulturen veranschaulichen gut die allgemeine Analyse :

— man findet genau die drei verschiedenen, in Betracht gezogenen Verhältnisse,

— die Beziehungen zwischen den Gleichgewichtsdosen N und den Grenzdosen der Wirtschafts- und Energiebilanzen hängen tatsächlich von den vorhergehenden Stickstoffrestbeständen ab, man verzeichnet jedoch ebenfalls einen Einfluss :

— der klimatischen Verhältnisse (wie es der Vergleich der Ergebnisse von 1977 und 1978 zeigt),

— der pedologischen und landwirtschaftlichen Verhältnisse, (die verschiedene geographische Herkünfte der experimentalen Ergebnisse beinhalten).

РЕЗЮМЕ

Последействие азотного удобрения на экономический, энергетический и азотный балансы удобрения последующих культур. Теоритический анализ этой проблемы и наблюдавшиеся экспериментальные данные.

ДЕКО Ж., ДЮТЕН Г., ПЮЖОЛЬ Б.

Напоминаются прежде всего следующие общие положения :

— ответы культур вобщем менее чем пропорциональны на уровне факторов продукции которым они подчиняются. Таков пример фактора азота ;

— на кривых ответа (на азот) отмечается несколько замечательных точек, особенно тех, абсциссы которых измеряют уровень необходимый для достижения равновесия внесение — вынос (Na), или дозы необходимые для получения наилучшего экономического или энергетического баланса ;

— в практическом отношении внесение азотных удобрений приводит к образованию остаточного азота, не вынесенного культурой ;

— остаточные количества азота эволюционируют различными путями и, в частности могут принять участие в действии этого фактора на последующую культуру и, как последствие — на абсциссы замечательных точек кривой. В случае положительного последействия (N) оно вызовет в то-же время увеличение дозы внесения (азотное удобрение), для достижения равновесного состояния (Na) и уменьшения пороговых доз экономического (Ne), или энергетического (Nw) оптимумов ;

— из этого вытекает возможность существования трех разных положений :

Na > Ne : обеднение среды азотом (минеральным)
Na = Ne : состояние равновесия
Na < Ne : обогащение среды минеральным азотом

Ответы (на внесение азота) разных культур пшеницы хорошо иллюстрируют общий анализ :

— три рассматривавшихся положения действительно встречаются на практике ;

— соотношение между равновесными дозами азота и пороговыми дозами экономических и энергетических балансов действительно зависит от остаточных количеств азота, причем отмечается также и влияние :

— климатических условий (как показывает сравнение результатов полученных в 1977 и 1978)

— условий почвы и приемов культуры (включая и географическое происхождение полученных экспериментальных результатов).

Références bibliographiques

AVNIMELECH Y. et RAVEH J., 1976. Nitrate leakage from soils differing in texture and nitrogen load. *J. Environ. Qual.*, **5** (1), 79-82.

DECAU J., COMBRET M., PUJOL B., 1977. Effets de fertilisations azotées de différents niveaux en rotation céréalière dans le Sud-Ouest de la France. I. — Production de grains et de protéines. *Ann. agron.*, **28** (3), 313-328.

DEMOLON A., 1956. *Croissance des végétaux cultivés*. Dunod éd.

DOWDELL R. J., WEBSTER C. P., 1976. Denitrification and leaching of nitrogen fertilizers. *Proc. of the ADAS/ARC Conference on Agriculture and Water Quality MAFF Technical Bulletin*, n° 32 HMSO, 163-173, London.

FENN L. B., ESCARZAGA R., 1976. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. V. Soil water content and method of nitrogen applications. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **40** (4), 537-541.

FENN L. B., KISSEL D. E., 1975. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds in calcareous soils. VI. — Effect of calcium carbonate content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39**, 631-633.

GADET R., SOUBIES L., 1962. Le bilan de l'azote dans les sols. Expérimentation de longue durée en cases lysimétriques et utilisation de l'isotope stable de l'azote ^{15}N. *C. R. Acad. Agr. Fr.*, **48**, 145-153.

GRAFFIN Ph., 1971. Etude intégrée de la décomposition d'apports organiques dans le sol. Evolution du carbone et de l'azote, liaison à la fraction minérale, modifications des propriétés physiques. *Ann. agron.*, **22**, 213-239.

HUTTER W., 1976. Energie consommée pour la production de quelques cultures, *C. R. Acad. Agr. Fr.*, **62** (4), 297-306.

MATOCHA J. E., 1976. Ammonia volatilization and nitrogen utilization from sulfur-coated ureas and conventional nitrogen fertilizers. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **40** (4), 597-601.

NOLOT J. M., 1978. Communication personnelle, Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF).

RÉMY J. C., HÉBERT J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C. R. Acad. Agr. Fr.*, 700-714.

SIMON-SYLVESTRE G., 1960. L'enfouissement des pailles dans le sol. Etude générale et répercussions sur la microflore du sol. *Ann. agron.*, 5-53 et 117-219.

SIMPSON J. R., FRENEY J. R., 1974. The fate of fertilizer nitrogen under different cropping systems. *Fertilizers and the Environment Proceedings, Symposium*, Sydney University. Leece éd. 27, 33.

SOUBIÈS L., GADET R., MAURY P., 1952. Migration hivernale de l'azote nitrique dans un sol limoneux de la région toulousaine. *Ann. Agron.*, 365-384.

STEFANSON R. C., 1975. Denitrification from nitrogen fertilizer placed at various depths in the soil-plant system. *Soil Sci.*, 353-363.

Ann. agron., 1979, **30** (4), 323-327.

Pouvoir réducteur des racines des plantes cultivées. Ses modifications par une courte période d'excès d'eau

C. DUTHION

avec la collaboration technique de Josiane MORTIER

Station de Science du Sol, Centre de Recherches de Dijon, I.N.R.A., 17, rue Sully, 21034 *Dijon Cedex*

Résumé

Les pouvoirs réducteurs des racines de treize espèces cultivées, mesurés par le 2-6 dichlorophénol-indophénol, sont très inégaux ; on peut cependant rapprocher les espèces d'une même famille botanique ou d'un même type physiologique. Une courte période d'excès d'eau provoque une augmentation du pouvoir réducteur des racines pour les espèces chez lesquelles il est initialement élevé mais n'induit aucune modification chez les autres. Il n'y a pas de relation entre la valeur du pouvoir réducteur d'une espèce et ses variations et le degré de tolérance à l'excès d'eau.

I. — Introduction

Des variations de l'état physiologique des plantes ou des organes végétaux, sous l'influence de l'âge ou des conditions de milieu, se traduisent par des changements dans le déroulement du métabolisme intermédiaire.

Jolivet *et al.* (1970) ont mis par exemple en évidence l'existence de trois phases dans la croissance et le développement de la racine d'Endive qui sont caractérisées par des modifications des métabolismes des acides organiques et des acides aminés libres. Ils ont montré que l'entrée en maturité de la racine peut être décelé à l'aide d'un test biochimique simple, fondé sur la mesure du pouvoir réducteur des tissus par les 2-6 dichlorophénol-indophénol ; ils en ont d'ailleurs préconisé une application à la détermination de la période optimale de forçage de la racine d'Endive.

L'origine du pouvoir réducteur des tissus n'est pas bien établie, bien qu'il soit lié notamment à la présence de composés qui possèdent une structure ène-diol (acide ascorbique, dihydroquinones,...). Cependant la relation entre pouvoir réducteur et état physiologique a été trouvée pour d'autres organes souterrains, tels que les bulbes d'Iris ou de Tulipe (Jolivet et Le Nard, 1975).

La présence d'eau libre, saturant tout ou partie des pores du sol, est fréquente dans de nombreuses situations. Elle crée des conditions très défavorables à l'activité des plantes, mais ses conséquences agricoles dépendent beaucoup de l'espèce végétale. Nous avons montré, chez les espèces cultivées, une certaine convergence entre

le comportement des plantes ennoyées et l'évolution des teneurs en malate dans leurs racines (Duthion, 1976, 1978) ; celles-ci diminuent chez les espèces les plus sensibles alors qu'elles varient peu ou augmentent chez des espèces relativement tolérantes.

L'intérêt d'un test par le criblage des espèces et/ou variétés quant à leur comportement à l'hypoxie est évident, aussi bien pour les choix culturaux que pour la sélection de végétaux plus aptes à la mise en valeur des milieux soumis à la contrainte excès d'eau. Cherchant un test plus simple que celui précédemment décrit, nous nous sommes proposés de vérifier les possibilités d'utilisation de la variabilité du pouvoir réducteur, indicatrice, d'après Jolivet, des modifications du métabolisme intermédiaire.

II. — Conditions expérimentales

L'étude a porté sur treize espèces cultivées : Blé (*Triticum vulgare* L., cv Ducat), Chanvre (*Cannabis sativa* L., cv Fibrimon 24), Fétuque élevée (*Festuca elatior* L., cv Manade), Lin (*Linum usitatissimum* D, cv Clara), Maïs (*Zea mays* L., cv LG 11), Moutarde noire (*Sinapis nigra*), Pois (*Pisum sativum* L., cv Petit Provençal), Ray-grass d'Italie (*Lolium italicum* A. Br., cv Barmultra), Sorgho (*Sorghum vulgare sudanense*, cv Trudan I), Tabac (*Nicotiana tabacum* L., cv Xanthi n.c.), Tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill, cv Marmande), Tournesol (*Helianthus annuus* L., cv Issanka), Trèfle blanc (*Trifolium repens* L., cv Ladino).

Les cultures ont été faites sous serre, en pots de végétation de 1 litre. Le support est un sable quartzeux (1-4 mm). Après prégermination des semences, les jeunes plantules sont repiquées à raison de dix à vingt plantes par pot selon l'espèce (cinquante pour les Graminées fourragères). L'alimentation hydrique et minérale est assurée par un arrosage automatique à l'aide d'une solution nutritive complète.

Après 3 à 4 semaines de culture (2 mois pour le Tabac), un ennoyage est réalisé sur la moitié des pots, par apport de solution nutritive diluée jusqu'au niveau supérieur du sable ; ce mode d'ennoyage permet de fournir globalement la même alimentation minérale à toutes les plantes et assure aux racines des plantes ennoyées un environnement ionique comparable à celui qui serait dû à une « solution du sol ». La solution est drainée tous les 3 jours afin de limiter les effets secondaires dûs à l'accumulation de gaz carbonique et aux phénomènes de réduction, puis renouvelée immédiatement.

La sensibilité à l'ennoyage des espèces est appréciée à l'aide de deux critères : la croissance pondérale relative pendant la période d'ennoyage, la rapidité d'apparition des symptômes de souffrance et leur extension (Duthion, 1976). Nous avons ainsi établi dans les conditions expérimentales propres à cet essai un classement en trois groupes :

— espèces très peu tolérantes à l'excès d'eau (Chanvre, Moutarde, Pois, Tabac, Tomate) : croissance pondérale après 6 jours d'ennoyage égale ou inférieure à 50 p. 100 de celle des plantes témoins durant la même période, apparition rapide et extension des symptômes de souffrance,

— espèces moyennement tolérantes (Blé, Lin, Ray-grass, Trèfle),

— espèces relativement tolérantes (Fétuque, Maïs, Sorgho, Tournesol) : croissance pondérale peu différente de celle des plantes-témoins après 6 jours d'ennoyage, symptômes de souffrance peu étendus.

Des pots sont prélevés au temps 0 puis après 3, 6 et 12 jours d'ennoyage (un pot témoin et un pot excès d'eau). Les racines sont séparées par un lavage rapide sous eau. Une partie aliquote est broyée deux fois une minute dans une solution aqueuse d'acide métaphosphorique à 5 p. 100 dans le rapport 1/6. Le pouvoir réducteur est mesuré sur le filtrat du broyat à l'aide d'une solution de 2-6 dichlorophénol-indophénol à 0,1 p. 100 jusqu'à coloration rose-mauve persistante (Jolivet et Le Nard, 1975).

III. — Résultats

Les résultats des mesures (au douzième jour, les systèmes racinaires de plusieurs espèces sont très abîmés par le traitement excès d'eau, mais les mesures ne portent alors que sur les zones encore saines) sont rassemblés dans le tableau 1. Nous avons conservé l'expression habituelle par rapport à la matière fraîche car le sens des comparaisons est semblable à celui que l'on observe avec la référence à la matière sèche.

TABLEAU 1

Pouvoir réducteur des racines, µM de 2-6 dichlorophénol-indophénol pour 10 g de matière fraîche

Reducing power of roots, µM of 2-6 dichlorophenol indophenol for 10 g of fresh matter

Durée du traitement excès d'eau en jours	Plantes témoin				Plantes excès d'eau			
	0	3	6	12	0	3	6	12
Moutarde	8,7	9,7	4,9	9,0	8,7	13,0	15,7	24,6
Trèfle blanc	7,6	7,5	6,4	7,9	7,6	8,6	11,7	10,3
Pois	6,4	5,0	4,4	4,5	6,4	5,7	4,5	4,3
Chanvre	5,5	3,2	3,9	3,8	5,5	6,9	8,2	—
Lin	3,7	3,3	3,2	2,3	3,7	8,5	9,4	3,5
Maïs	3,4	3,3	3,6	4,1	3,4	3,7	3,7	4,3
Sorgho	2,8	2,4	2,9	2,7	2,8	4,0	4,2	4,2
Tomate	2,5	1,7	1,9	2,4	2,5	2,2	1,2	2,4
Tabac	1,6	1,4	1,3	1,4	1,6	1,5	1,0	1,0
Blé	1,4	1,3	1,4	2,8	1,4	2,0	1,4	1,4
Tournesol	0,5	0,4	0,3	0,6	0,5	0,5	0,5	1,0
Ray-grass	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3
Fétuque élevée	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,5	0,3	0,3

Trois faits se dégagent de ces résultats :

1. Les pouvoirs réducteurs des racines des treize espèces étudiées sont très inégaux. On observe cependant des valeurs assez voisines pour des espèces de la même famille botanique (Pois et Trèfle, Tabac et Tomate) ou, dans une famille, du même type physiologique (Maïs et Sorgho, Fétuque et Ray-Grass).

2. Une courte période d'excès d'eau provoque une augmentation du pouvoir réducteur des racines chez quelques espèces ; ce sont, à l'exception du Maïs et du Pois, les espèces chez lesquelles le pouvoir réducteur est initialement élevé. L'hypoxie n'induit pas la formation de substances réductrices du 2-6 dichlorophénol-indophénol dans les racines des plantes dont le pouvoir réducteur initial est faible.

3. Il n'apparaît aucune relation entre la valeur du pouvoir réducteur des racines, mesuré par le 2-6 dichlorophénol-indophénol ou ses variations pendant la contrainte excès d'eau et le niveau de tolérance à celle-ci des espèces, mesuré par la croissance relative durant la période d'ennoyage et les symptômes visuels de souffrance.

Reçu pour publication en septembre 1979.

Summary

Reducing ability of cultivated plant roots and how a short period of excess water modifies it.

The reducing ability of the roots of thirteen different species, as measured with 2-6 dichloroindophenol, is highly variable, although the species of a selfsame family of plants, or of same physiological type, may be likened to some extent. A short period of excess water increases the reducing ability of the species in which it is initially high but does not bring in any change in the others. There is no connection between the value of the reducing ability of a species and its variations, and its excess-water tolerance.

Zusammenfassung

Reduktionsfähigkeit der Wurzeln der Kulturpflanzen. Änderungen durch einen Wasserüberschuss während eines kurzen Zeitabschnitts.

Die mittels 2,6 Dichlorophenol-Indophenol gemessene Reduktionsfähigkeit der Wurzeln von dreizehn Arten von Kulturpflanzen sind sehr ungleich. Es ist jedoch möglich, die Arten einer gleichen botanischen Gruppe oder einer gleichen physiologischen Art einander anzunähern. Ein Wasserüberschuss während eines kurzen Zeitabschnitts bewirkt eine Steigerung der Reduktionsfähigkeit bei den Arten, bei welchen dieselbe von Anfang an gross ist, erzeugt jedoch keine Änderung bei den anderen. Es besteht keine Beziehung zwischen dem Wert der Reduktionsfähigkeit einer Art und deren Schwankungen und dem Toleranzgrad bezüglich des Wasserüberschusses.

РЕЗЮМЕ

Восстановительная способность корней культурных растений и ее изменения, вызванные коротким периодом избытка влаги.

ДЮТИОН К.

Восстановительная способность корней, измерявшаяся с у тринадцати видов культурных растений с помощью 2-6 дихлор-индофенола очень неодинакова ; но у ви дов принадлежащих к одной и той-же ботанической семье и тому-же физиологическому типу она приблизительно одинакова. Короткий период избыточного увлажнения вызывает усиление восстановительной способности у виков растений у которых эта способность уже повышена, но не индуцирует никаких изменений ее у других растений. Не найдено никакого соотношения между величиной восстановительной способности корней и ее изменениями, и степенью толерантности к избыточной влажности.

Références bibliographiques

DUTHION C., 1976. Variations des teneurs en acides organiques de racines de plantes soumises à un excès d'eau. *Ann. agron.*, **27,** 207-220.

DUTHION C., 1978. Composition en acides organiques des racines de plantes soumises à une période d'excès d'eau à différents stades de végétation. *Ann. agron.*, **29,** 169-176.

JOLIVET E., NICOL M. Z., COCHET J. P., 1970. Mise en évidence, par fixation de $^{14}CO_2$ gazeux, de modifications dans le métabolisme des acides organiques et des acides aminés libres dans la racine tubérisée de l'endive (*Cichorium intybus L.*) au cours de sa croissance et de son développement : relation avec la production du chicon — application à la recherche d'un test pratique permettant d'estimer la période optimum de forçage. *Section horticole d'Eucarpia, Symposium international : la Chicorée de Bruxelles*, Gembloux, 177-206.

JOLIVET E., LE NARD M., 1975. Réduction du 2-6 dichlorophénol-indophénol par des extraits métaphosphoriques de bulbes d'Iris hollandais et de Tulipe : variations du pouvoir réducteur au cours de leur grossissement et de leur conservation. *Physiol. Vég.*, **13,** 291-306.

Ann. agron., 1979, **30** (4), 329-336.

Rapport de l'évapotranspiration potentielle calculée à l'évaporation mesurée sur bac

I. — Justification d'une relation expérimentale obtenue en zone tropicale

A. PERRIER et M. HALLAIRE

Station de Bioclimatologie,
Centre National de Recherches Agronomiques, I. N. R. A.,
78000 *Versailles*

Résumé

Une étude antérieure de Baldy avait permis d'établir expérimentalement en Haute-Volta la relation (1) exprimant le rapport de l'ETP_c calculée par la relation de Penman à l'évaporation du bac (class A) en fonction de l'humidité relative HR.

Le calcul théorique proposé ici conduit à la relation (6) selon laquelle le rapport précité dépendrait non seulement de HR mais aussi des rayonnements, de la température, du vent et d'un coefficient β représentant le rapport du coefficient d'échange relatif au bac à celui figurant dans la formule de Penman (5).

Compte tenu des conditions climatiques de Haute-Volta (tableau), l'expression donnant le rapport ETP_c/E_{bac} peut se ramener à la formule plus simple (8) dont les deux seules variables sont HR et β ; d'autre part et sous réserve d'attribuer à β une valeur constante, qui d'après les données est relativement stable bien qu'une différence apparaisse entre la saison humide et la saison sèche, cette formule confirme le résultat expérimental (1).

Introduction

La mesure de l'évaporation de la nappe d'eau libre d'un bac dont la dimension, la forme et la disposition sont normalisées est pratiquée depuis longtemps en raison de sa simplicité, de son coût modique et des possibilités de standardisation qu'elle offre. Naturellement, l'évaporation ainsi mesurée dépend essentiellement des grandeurs climatiques et des corrélations pouvant exister entre ces grandeurs pour un lieu considéré (OMM/WMO, 1966).

En vue de son utilisation pratique, il était normal de définir les liens existant entre cette grandeur (E_{bac}) et une des deux autres grandeurs (également sous la dépendance majeure des facteurs climatiques) que sont l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Penman, ETP_c, et éventuellement l'évapotranspiration maximale mesurée sur gazon, ETR_M. C'est pourquoi il existe un certain nombre de relations

expérimentales entre ces grandeurs qui ne conduisent malheureusement pas à un simple rapport constant du fait des sensibilités différentes de l'évaporation des divers types de bac (E_{bac}) et de l'ETP_c ou ETR_M à des facteurs du milieu tels que la ventilation, le déficit hydrique de l'air et la température de la surface (Bultot et Dupriez, 1973).

C'est ainsi par exemple, selon la formule trouvée expérimentalement par Baldy (1978) en Haute-Volta, que le rapport ETP_c (calculé par la formule de Penman) à E_{bac} (mesurée sur bac « class A ») apparaît surtout fonction de l'humidité relative HR de l'air (laquelle, dans la région subtropicale où a été établie la formule, présente au cours de l'année une variation importante et très certainement dominante). Cet auteur donne pour la Haute-Volta (toutes stations confondues) la relation suivante :

$$ETP_c/E_{bac} = 1/(2 - 1{,}25\ HR)\ . \qquad (1)$$

Ecrivant cette équation sous une forme plus générale :

$$ETP_c/E_{bac} = 1/(a - bHR) \qquad (1\ bis)$$

on constate qu'en réalité les deux paramètres a et b présentent de légères variations selon le lieu mais aussi les périodes de l'année. Ainsi, à titre d'exemple, on trouve pour Bobo-Dioulasso :

— $a = 1{,}93$ et $b = 1{,}06$ en moyenne sur l'ensemble de l'année,
— $a = 1{,}93$ et $b = 1{,}01$ pour la saison sèche (décembre à mai),
— $a = 1{,}59$ et $b = 0{,}61$ pour la saison humide (juin à novembre).

Il est intéressant, certes, de chercher à expliciter la relation particulière trouvée et les variations observées des paramètres a et b à partir d'un raisonnement de portée générale basé sur les relations communément admises, ce que nous nous proposons de faire dans le présent papier. Mais la relation générale de base présentée doit permettre aussi d'expliciter et d'élaborer toute autre relation plus complexe fonction des particularités climatiques d'autres lieux. La relation expérimentale utilisée ne représente qu'un exemple d'une relation locale, particulièrement simple, et dont l'extension à d'autres régions tropicales doit être faite en fonction des particularités climatiques qui la justifient localement.

I. — Expression du rapport ETP_c/E_{bac}

La formule de Penman étant à présent la formule la plus souvent utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle, nous élaborerons cette expression en considérant précisément l'équation de Penman (1948) :

$$EP = (P'\ Rn + \gamma Ea)/(P' + \gamma) \qquad (2)$$

avec

$$Ea = (LM/RT).h(U).P'(Ta - Tr) \qquad (2\ bis)$$

(où Rn est le rayonnement net ; Ta, la température de l'air ; Tr, la température du point de rosée de l'air ; γ, la constante psychrométrique ; P', la dérivée de la pression de vapeur saturante ; L, la chaleur latente de vaporisation de l'eau ; R, la constante des gaz parfaits ; M, la masse molaire de l'eau et T la température de l'air en degrés Kelvin).

La fonction du vent h(U) qui figure dans l'expression sera forcément différente selon qu'il s'agit :

— d'un gazon court, entièrement couvert d'une mince pellicule d'eau libre (saturation) ; la fonction h(U) correspond alors au véritable coefficient d'échange $h_g(U)$ entre la surface évaporante du gazon et le niveau de référence où sont mesurés les facteurs climatiques ;

— d'un bac d'évaporation, dont la surface évaporante est au-dessus du sol et est par ailleurs sujette à des effets latéraux ; la fonction $h_b(U)$ applicable à ce cas sera dès lors supérieure à $h_g(U)$ (Hanson et Rauzi, 1977) ;

— ou de l'évapotranspiration maximale (ETR_M) d'un couvert végétal bien alimenté en eau mais non mouillé en surface ; en toute rigueur, l'équation (2) ne lui est pas applicable en raison des résistances autres que la résistance atmosphérique s'opposant au flux de vapeur (Penman et Long, 1960 ; Perrier, 1975). Les ajustements néanmoins réalisés (Penman, 1956) avec des valeurs expérimentales d'ETR_M (gazon en particulier) conduisent à introduire une fonction empirique du vent $h_0(U)$; c'est cette fonction qui, utilisée dans la relation (2) par l'intermédiaire de la relation (2 *bis*), donne la formule de Penman très largement utilisée pour calculer l'évaporation potentielle, ETP_c.

En utilisant la relation (2) compte tenu des indications précédentes, le rapport recherché ETP_c/E_{bac} peut alors s'écrire en première approximation :

$$\frac{ETP_c}{E_{bac}} = \frac{Rn + \gamma(LM/RT)\, h_0\,(U)\,(Ta - Tr)}{Rn + \gamma(LM/RT)\, h_b(U)\,(Ta - Tr)} \,. \tag{3}$$

L'approximation consiste :

— à ne pas expliciter les termes d'échange par conduction avec le sol et la masse d'eau et de les supposer inclus dans Rn, terme qui exprimera dès lors la totalité de l'énergie disponible au niveau de la surface ;

— à négliger les différences entre les énergies disponibles Rn relatives au couvert végétal (pris en compte dans le calcul d'ETP_c) et à la surface d'eau libre (E_{bac}) ; ces différences négatives résultant des écarts d'albédo et de température de surface ne dépassent pas 15 p. 100 (Mukammal et Neumann, 1977).

En exprimant le déficit de saturation de l'air en fonction de son humidité relative HR (P(Ta) pression de vapeur saturante à la température de l'air) :

$$Ta - Tr = \{P(Ta)/P'\}\{1 - HR\} \tag{4}$$

et en posant :

$$\beta = h_b(U)/h_0(U) \tag{5}$$

le rapport précédent s'écrit (en assimilant l'expression $\gamma LM/RT$ à une constante α_0) :

$$\frac{ETP_c}{E_{bac}} = \frac{1 + \alpha_0\{P(Ta)/P'\}\, h_0(U)\{1 - HR\}/Rn}{1 + \alpha_0\,\beta\{P(Ta)/P'\}\, h_0(U)\{1 - HR\}/Rn} \,. \tag{6}$$

Si l'on pose :

$$X = \{P(Ta)/P'\}\, h_0(U)\{1 - HR\}/Rn$$

le rapport apparaît alors fonction

— de cette expression X qui regroupe tous les facteurs du climat :

- le rayonnement net (ou l'énergie disponible) Rn,
- la température (à travers P(Ta)/P'),
- la vitesse du vent U,
- l'humidité relative HR,

— d'un paramètre de forme β qui dépend du vent et des contrastes d'évaporation entre le bac et le milieu environnant.

Ainsi, la forme très générale de variation du rapport recherché

$$\frac{ETP_c}{E_{bac}} = \frac{1 + \alpha_0 X}{1 + \alpha_0 \beta X} \qquad (6\ bis)$$

indique que les résultats très variés peuvent être obtenus selon les lieux et les variations mensuelles du climat.

II. — Justification de la relation trouvée expérimentalement en Haute-Volta

L'expression précédente fait ressortir non seulement l'humidité relative, comme dans la relation expérimentale, mais comme nous l'avons souligné, tous les autres facteurs climatiques. Posons par analogie avec la relation expérimentale :

$$\alpha = \alpha_0 \{ P(Ta)/P' \} h_0(U)/Rn \qquad (7)$$

soit

$$\frac{ETP_c}{E_{bac}} = \frac{1 + \alpha(1 - HR)}{1 + \beta\alpha(1 - HR)} . \qquad (8)$$

Du calcul effectué, sur la base des données climatiques de Bobo-Dioulasso, du rayonnement net estimé (formule de Penman) et de la fonction du vent $h_0(U)$ de Penman, il ressort en fait que le paramètre α ne présente pas vraiment de variations systématiques en cours d'année, bien que, comme pour la relation expérimentale, la période sèche puisse être dissociée de la période humide. En première approximation, il peut être assimilé, dans ce cas particulier, à une constante de l'ordre de 0,8 (cf. tabl. 1).

Ainsi, le rapport ETP_c/E_{bac} apparaît bien lié essentiellement à l'humidité relative selon une fonction hyperbolique et le coefficient β est pratiquement le seul paramètre susceptible de varier dans le temps et l'espace.

L'identification de l'expression théorique (8), appliquée aux données de Bobo-Dioulasso, avec la relation expérimentale n'est certes pas parfaite, mais conduit cependant à des valeurs suffisamment proches, comme le montre la représentation graphique pour la justifier au niveau où l'on se place. Il suffit par exemple de vérifier à quelles conditions ces deux expressions coïncident pour les deux bornes extrêmes ($HR = 1$ et $HR = 0$). Compte tenu des approximations soulignées et d'une comparaison sur un lot réduit de données mensuelles, il ne s'agit pas de faire les meilleurs ajustements entre théorie et expérimentation, mais une simple vérification des ordres de grandeur et des suggestions ou précisions qu'ils peuvent apporter.

TABLEAU 1

Données de Bobo-Dioulasso et valeurs calculées du rayonnement net et du paramètre α (d'après Baldy)

Bobo-Dioulasso data and calculated values of net radiation and parameter α

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T °C	26,0	28,5	29,9	29,3	28,4	26,2	24,8	24,0	24,5	26,4	27,0	25,7
Rg (10^6 J m^{-2} j^{-1}).	21,3	24,0	23,6	23,7	23,7	23,4	20,3	19,2	21,0	21,2	21,0	19,7
U (m s^{-1})	3,7	3,6	3,6	4,0	4,3	4,1	3,7	3,4	2,7	2,9	2,9	3,0
HR	0,18	0,20	0,27	0,47	0,61	0,71	0,79	0,84	0,80	0,66	0,43	0,26
ETP_c/E_{bac}	0,55	0,56	0,64	0,68	0,72	0,87	0,88	0,96	0,87	0,85	0,75	0,64
Rn (calculé).....	11,5	12,9	14,1	15,6	16,3	15,9	14,7	13,2	13,9	14,4	13,5	11,5
α (calculé)	1,00	0,92	0,86	0,83	0,82	0,79	0,78	0,81	0,67	0,70	0,75	0,88

a) Ainsi, en considérant la borne HR = 1, le rapport ETP_c/E_{bac} prend la valeur :

1 : pour l'expression théorique (8)

et

$1/(a - b)$: pour la relation expérimentale (1 *bis*)

soit 1,02 (en saison humide) et 1,15 (en saison sèche).

L'accord est donc satisfaisant et même excellent pour la saison humide à laquelle correspondent les valeurs de HR proches de la valeur 1, valeur qui sert ici à réaliser l'identification.

b) D'autre part, à la borne HR = 0 correspondent des valeurs du rapport EPT_c/E_{bac} égales à :

$(1 + \alpha)/(1 + \alpha\beta)$ selon l'expression théorique (8)

et

$1/a$ selon la relation expérimentale (1 *bis*)

dans ce cas l'égalité entre ces deux valeurs implique :

$$\beta = \{ a(1 + \alpha) - 1 \}/\alpha \qquad (9)$$

c'est-à-dire :

$\beta = 3{,}1$ en saison sèche (avec $\alpha = 0{,}8$ et $a = 1{,}93$)
$\beta = 2{,}3$ en saison humide (avec $\alpha = 0{,}8$ et $a = 1{,}59$) .

La figure 1 représente les courbes obtenues pour $\alpha = 0{,}8$ et les trois valeurs 2, 2,5 et 3 du paramètre β par rapport aux points expérimentaux et aux relations expérimentales. Les mois de transition, mai et novembre, entre saison sèche et humide, semblent bien devoir s'ajuster pour le premier (mai) avec la période sèche malgré son humidité relative déjà élevée et pour le second (novembre) avec la période humide malgré son humidité relative assez basse.

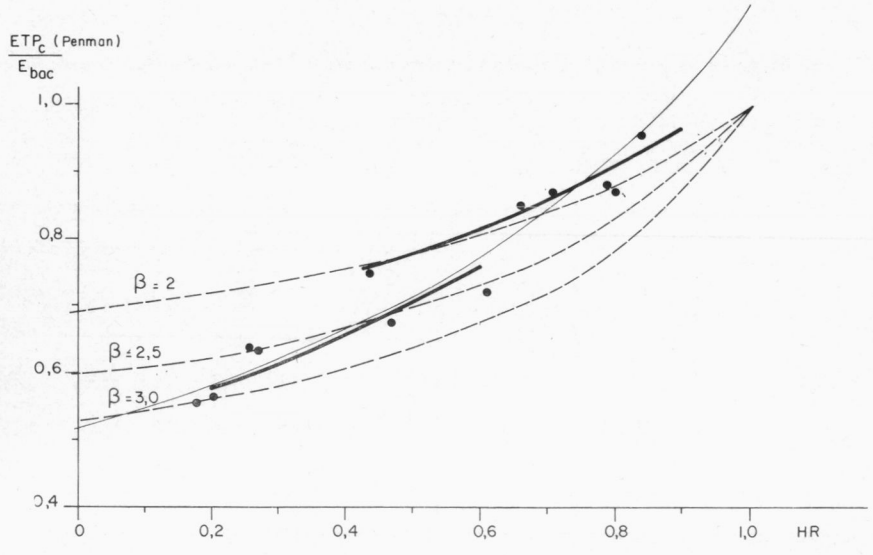


FIG. 1. — *Evolution du rapport* ETP_c/E_{bac} *en fonction de l'humidité relative HR (● points expérimentaux ; —— ajustement moyen ; ▬▬ ajustement saison sèche et saison humide ; — — — courbe théorique selon la valeur du coefficient* β).

Variation of the ratio ETP_c/E_{pan} *as a function of relative humidity HR (● experimental points ; —— mean adjustement ; ▬▬ adjustements for dry and wet season ; — — — theoretical curves for 3 values of* β).

Conclusions

Ainsi, en dépit des approximations introduites (différence de rayonnement net entre le bac et l'extérieur non prise en considération), l'expression théorique (8) rend suffisamment bien compte de la relation expérimentale simple trouvée, malgré le grand nombre de facteurs climatiques dont théoriquement elle dépend. Certes, cette confrontation est d'autant plus satisfaisante que le rapport $\beta \{ \beta = h_b(U)/h_0(U) \}$ est proche dans la zone tropicale étudiée de l'une ou l'autre des deux valeurs indiquées (3,1 ou 2,3) suivant que l'on est en saison sèche ou humide (ces deux valeurs de β seraient plutôt, selon la figure 1 : 2,7 et 2). Ce dernier résultat est suffisamment plausible pour que la relation expérimentale puisse être considérée comme conforme à la théorie. Les ordres de grandeur de ce coefficient sont non seulement bons, mais encore la variation selon deux saisons aussi tranchées va dans le sens de la logique du phénomène ; en effet, plus la saison sèche est contrastée et plus la sécheresse environnante accroît les effets latéraux qui, compte tenu de la relation utilisée pour traduire les échanges, modifient simplement le coefficient d'échange global du bac $h_b(U)$, accroissant ainsi le rapport β (Mukammal et Neumann, 1977).

On notera aussi qu'inversement l'expression théorique (6) doit permettre d'analyser le rapport ETP_c/E_{bac} dans d'autres conditions climatiques. Ce rapport est fonction hyperbolique non seulement de (1 — HR) mais aussi des trois grandeurs P(Ta)/P', $h_0(U)$ et 1/Rn (coefficient α) : il dépend aussi de façon plus complexe, comme on l'a vu et comme on le démontrera dans un autre article, de la vitesse du vent et des

contrastes d'une part aérodynamiques et d'autre part de bilan d'énergie entre le bac et la zone environnante (coefficient β).

Ainsi se trouve soulignée une fois de plus la très grande variabilité du rapport ETP_c/E_{bac} que l'on a souvent essayé de cerner. Toute solution, plus ou moins simple, ne peut donc être le fait que d'une heureuse combinaison locale de facteurs ; en effet, dans le cas choisi pour illustrer cette analyse théorique, on observe une variabilité réduite pour la fonction du vent (faible variation de vitesse) et pour le rapport P(Ta)/Rn, surtout quand on ne considère que les valeurs mensuelles.

S'il est par conséquent très utile de mettre en évidence, par la théorie, la simplicité de la relation expérimentale dans le cas de la Haute-Volta (Baldy, 1978), il convient également d'insister sur la nécessité de tester toute extrapolation d'une telle formule, même si l'on demeure dans des zones tropicales semblables.

Reçu pour publication en septembre 1978.

Summary

Ratio between calculated potential evapotranspiration and pan-evaporation

I. — Justification of an experimental relation set in tropical zone

A previous study by Baldy gave an experimental relation established in « Haute-Volta », expressing the ratio between evapotranspiration calculated by Penman's formula ETP_c and evaporation measured on pan (class A) E_{bac}, in function of relative humidity HR.

The theoretical calculation developed here leads to the relation (6) which details this ratio. It is not only a function of relative humidity but of course also a function of radiative fluxes, air temperature, wind speed and a coefficient β, the ratio between the exchange coefficient of the pan and the wind speed function of Penman's formula (relation (5)).

Under the particular climatic conditions of « Haute-Volta » (see table), the proposed theoretical relation of the ratio between the two evaporations mentioned, is reduced to a simplified one relating to only two variables : relative humidity and the coefficient β (relation (8)). In respect to a given value of β which appears, in function of data, quite stable, with nevertheless a difference between wet and dry seasons, this theoretical relation confirms experimental results.

Zusammenfassung

Bericht über die potentiale Evapotranspiration
erregnet an der am Versuchsbehälter gemessenen Verdunstung.

I. — *Nachweis einer im Tropenbereich erzielten experimentalen Beziehung.*

Eine frühere Untersuchung von Baldy hatte erlaubt, experimental in Ober-Voltagebiet die Beziehung (1) aufzustellen, die das Verhältnis des durch die Beziehung von Penman errechneten ETP_c bei der Verdunstung am Versuchsbehälter (Klasse A) in Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit HR ausdrückt.

Die theoretische hier vorgeschlagene Berechnung führt zu der Beziehung (6), nach welcher das vorerwähnte Verhältnis nicht nur von der relativen Feuchtigkeit abhängig sein würde, sondern auch von den Strahlungen, von der Temperatur, vom Wind und von einem Koeffizienten β, welcher das Verhältnis des auf den Versuchsbehälter bezüglichen Austauschkoeffizienten mit demjenigen der Formel von Penman (5) darstellt.

Unter Bezugnahme auf die klimatischen Verhältnisse im Ober-Voltagebiet (Tabelle) kann der Ausdruck, der die Beziehung ETP_c/E_{bac} (bac = Versuchsbehälter) wieder gibt, auf die einfachere Formel (8) gebracht werden, in welcher HR und β die zwei einzigen Veränderlichen sind. Ausserdem, und unter der Bedingung, β einen konstanten Wert zuzuordnen, welcher nach den Daten relativ stabil ist, bestätigt diese Formel die experimentalen Ergebnisse, obgleich ein Unterschied zwischen der feuchten und der trockenen Jahreszeit zum Vorschein kommt.

РЕЗЮМЕ

Соотношение между рассчитанной потенциальной эвапотранспирацией и эвапотранспирацией измеряемой с помощью бака.

I. — Доказательство формулы полученной при эксперименте в тропической зоне.

ПЕРРЬЕ А., АЛЛЕР М.

Пред'идущее изучение проведенное бальди позволило экспериментально установить в Высокой Вольта формулу (1), выражающую соотношение между ETP_c рассчитанной при помощи формулы Пенмана и эвапотранспирацией бака (класс А), в зависимости от относительной влажности HR.

Теоритический рассчет, предлагающийся в данной работе, приводит к формуле (6), по которой указанное соотношение зависит не только от относительной влажности, но также и от излучений, температуры, ветра, и коэффициента β представляющего соотношение между коэффициентом относительного обмена в баке и коэффициентом фигурирующим в формуле Пенмана (5).

Если принять во внимание климатические условия Высокой Вольта (табдица), то формулу соотношения ETP_c/E_{bac} можно будет упростить до формулы (8), в которой останется только две переменные величины HR и β ; с другой стороны, и с условием что β явится, судя по данным, величиной постоянной и относительно прочной, несмотря на существование разницы между сухим и влажным сезонами, формула эта подтверждает результаты экспериментов.

Références bibliographiques

BALDY Ch., 1978. Utilisation d'une relation simple entre le bac classe A et la formule de Penman pour l'estimation de l'E. T. P. en zone soudano-sahélienne. *Ann. agron.*, **29** (5), 439-452.

BULTOT F., DUPRIEZ G. L., 1973. L'évaporation d'un bac d'eau libre. Sa signification restreinte. *J. Hydrol.*, **20** (1), 83-95.

HANSON C. L., RAUZI F., 1977. Class A pan evaporation as affected by shelter and a daily prediction equation. *Agric. Meteorol.*, **18** (1), 26-36.

MUKAMMAL E. I., NEUMANN H. H., 1977. Application of the Priestley-Taylor evaporation model to assess the influence of soil moisture on the evaporation from a large weighting lysimeter and class A pan. *Bound. Layer Meteorol.*, **12** (2), 243-296.

OMM/WMO, 1966. *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration.* Techn. Note n° 83, 121 p.

PENMAN H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceed. Roy. Soc. London*, A, **193,** 129-145.

PENMAN H. L., 1956. Evaporation : an introductory survey. *Nether. J. Agric.*, **4** (1), 9-29.

PENMAN H. L., LONG I. F., 1960. Weather in wheat : an essay in micro-meteorology. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **86,** 16-50.

PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. — Evaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Ann. agron.*, **26** (1), 1-18.

PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. II. — Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince ». *Ann. agron.*, **26** (2), 105-123.

PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. — Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, **26** (3), 229-243.

Ann. agron., 1979, **30** (4), 337-346.

Rapport de l'évapotranspiration potentielle calculée à l'évaporation mesurée sur bac

II. — Expression en fonction d'un facteur de déséquilibre hydrique entre les surfaces évaporantes et l'air

A. PERRIER et M. HALLAIRE

Station de Bioclimatologie,
Centre National de Recherches Agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

Résumé

Nous avons montré précédemment comment le rapport de l'évaporation potentielle calculée par la formule de Penman (ETP_c) à l'évaporation du bac (E_b) pouvait s'exprimer en fonction des données climatiques (rayonnement, température, vent, humidité relative). Dans le cas particulier de la Haute-Volta, ce rapport théorique conduit à une expression uniquement fonction de l'humidité relative HR et d'un coefficient β exprimant le rapport du coefficient d'échange relatif au bac [$h_b(U)$] à la fonction du vent utilisée dans la formule de Penman. Dans ce cas la formule simplifiée trouvée (équation (3)) était en accord avec un résultat expérimental présenté par ailleurs (équation (2)).

Ayant rappelé la signification d'un coefficient μ (équation (5) et fig. 1) qui traduit l'état de déséquilibre hydrique entre les surfaces évaporantes et l'air et ayant assimilé le coefficient $h_b(U)$ au coefficient d'échange $h_1(U)$ d'une petite surface naturelle et homogène mais plus humide que la zone alentour, on montre que le coefficient $h_b(U)$ peut être exprimé en fonction de μ (équation (11)). Dès lors le coefficient β (équation (12) et tabl. 1) et, par corollaire, le rapport ETP_c/E_{bac} apparaissent également fonction de μ. Ce résultat permet alors une analyse complète du rapport ETP_c/E_{bac} en fonction des données du climat et du coefficient μ mesurable ou estimable.

Inversement, par ailleurs, en partant des valeurs numériques que l'on peut obtenir pour β par comparaison entre théorie et expérience (relation (3)), il a été possible de préciser les valeurs de ce coefficient μ dans ce cas particulier. La variation de μ ainsi trouvée entre les deux saisons (tabl. 2) souligne un effet d'oasis plus prononcé en saison sèche et correspond bien à ce que l'on pouvait supposer.

Introduction

Une étude de Baldy (1978) menée en région tropicale avait montré que le rapport de l'évapotranspiration potentielle calculée ETP_c à l'évaporation du bac (bac classe A) E_{bac}, systématiquement variable au cours de l'année, pouvait être défini comme une fonction hyperbolique de l'humidité relative HR. Pour la Haute-Volta (toutes stations confondues et pour l'ensemble de l'année), l'auteur trouvait en effet

$$\frac{ETP_c}{E_{bac}} = \frac{1}{2 - 1{,}25\ HR}\cdot \qquad (1)$$

En fait, on pouvait montrer que les coefficients a et b, figurant dans l'équation écrite sous sa forme générale,

$$\frac{ETP_c}{E_{bac}} = \frac{1}{a - bHR} \qquad (2)$$

présentaient une variation assez nette selon que l'on considérait les saisons sèche ou humide : à Bobo-Dioulasso par exemple on trouvait $a = 1{,}93$ et $b = 1{,}01$ en saison sèche ; $a = 1{,}59$ et $b = 0{,}61$ en saison humide.

Considérant les fonctions du vent $h_0(U)$ qui figurent dans l'expression du terme Ea de la formule de Penman et désignant par $h_b(U)$ la fonction relative au bac, il a été possible de démontrer par le calcul (Perrier et Hallaire, 1979) que le rapport en question pouvait se mettre sous la forme :

$$\frac{ETP_c}{E_{bac}} = \frac{1 + \alpha(1 - HR)}{1 + \alpha\beta(1 - HR)} \qquad (3)$$

— où α représente une fonction des facteurs climatiques autres que l'humidité relative (température, vent et rayonnement net $\alpha = \rho c_p(P(Ta)/P') \, h_0(U)/Rn$) et qui, dans le cas particulier étudié par Baldy, pouvait être assimilé à une constante,

— où β représente le rapport des deux fonctions du vent $h_b(U)/h_0(U)$, celle relative au bac et celle de la formule de Penman (1948).

La confrontation de cette relation (3) avec l'expression (2) conduisait à une similitude suffisamment bonne pour en déduire que la relation expérimentale était une approximation très valable de la relation théorique. On montrait aussi que pour les valeurs de Bobo-Dioulasso l'identification des formules (2) et (3) conduisait, suivant les saisons sèche ou humide, à deux valeurs assez différentes du coefficient β ($\beta \sim 2$ pour la saison humide et $\beta \sim 2{,}7$ pour la saison sèche).

Nous nous proposons à présent de mettre en évidence la relation existant entre le coefficient β et les conditions de milieu, en particulier l'état de déséquilibre hydrique entre la surface évaporante de la zone alentour et l'air qui la surmonte (μ). Les variations du coefficient β se trouvent ainsi explicitées en fonction de grandeurs mesurables pour chaque localisation, et une estimation de ce coefficient est donc possible (Mukammal et Neumann, 1977).

I. — Définition du coefficient μ facteur de déséquilibre hydrique entre une surface évaporante et l'air

On sait (Perrier, 1975) que l'évapotranspiration réelle ETR d'une surface homogène peut se mettre sous la forme

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \varphi_0) - \frac{P'}{P' + \gamma}\rho c_p \, h(U) \left\{ (Ts - Trs) - (Ta - Tra) \right\}. \qquad (4)$$

Dans cette formule, $\frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \varphi_0)$ (où Rn désigne le rayonnement net et φ_0 le flux de chaleur dans le sol) n'est autre que le premier terme de l'équation de Penman. h(U) est le coefficient d'échange entre la surface considérée et le niveau de

référence dans l'air. Quant à l'expression entre crochets (où Ts est la température de la surface considérée et Ta celle de l'air au niveau de référence, et où Trs et Tra sont les points de rosée aux deux mêmes niveaux), elle représente la variation du déficit de saturation entre les deux niveaux. Cette expression peut être :

a) nulle, c'est le cas représenté figure 1*a* où les gradients de température (Ts — Ta) et de température de points de rosée (Trs, Tra) sont les mêmes ;

b) positive (fig. 1*b*) : le gradient de température est supérieur à celui du point de rosée ;

c) négative (fig. 1*c*) : le gradient de température est inférieur et même de signe contraire à celui du point de rosée.

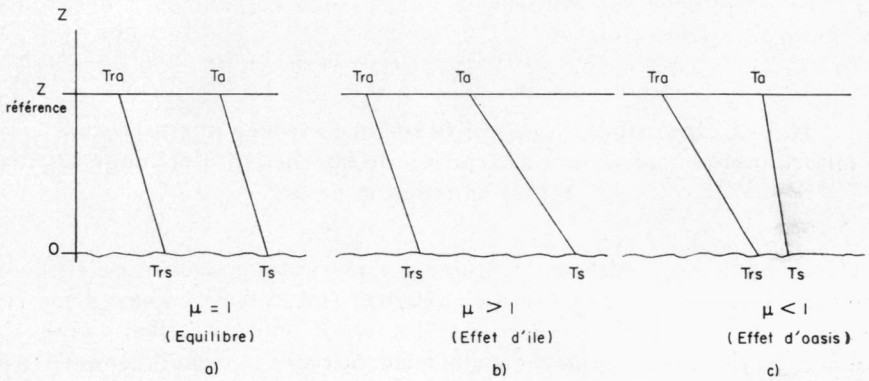


FIG. 1. — *Schéma explicatif du facteur de déséquilibre* μ.

Explicatory pattern of the equilibrium factor μ (*Ta, Ts : temperatures of air and of the surface ; Tra, Trs : dew points of air and very close the surface*).

Le cas *a*) correspond à un certain équilibre hydrique entre l'air ambiant et la surface évaporante ; le cas *b*) à des caractéristiques hydriques de l'air plus humides que celles de la surface évaporante, l'évaporation est inférieure au premier terme de l'équation de Penman (c'est le cas d'un effet d'île) ; quant au cas *c*), il correspond à une surface de caractéristiques hydriques plus humides que celles de l'air (effet d'oasis).

Mais on peut également exprimer ces situations en considérant le rapport

$$\mu = \frac{Ts - Trs}{Ta - Tra} \qquad (5)$$

— ainsi le cas d'équilibre *a*) correspondra à $\mu = 1$ et à l'égalité

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \varphi_0) ;$$

— un air humide par rapport à la surface (cas *b*)) correspondra à $\mu > 1$ et à l'inégalité

$$ETR < \frac{P'}{P' + \gamma}(Rn + \varphi_0) ;$$

— inversement le cas *c*) correspondra à $\mu < 1$ et à l'inégalité

$$ETR > \frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \varphi_0) .$$

La valeur de μ renseigne donc sur l'état d'équilibre entre la surface évaporante régionale et l'air, ainsi que sur le sens des échanges globaux entre masse d'air et surface sous l'angle des équilibres hydriques, la masse d'air tendant à se dessécher (effet d'île, cas *b*)) ou à s'humidifier (effet d'oasis, cas *c*)) ; le coefficient μ croît donc régulièrement de valeurs nettement inférieures à 1 à des valeurs supérieures à 1 quand la zone devient de plus en plus sèche par rapport à l'air.

Par contre, compte tenu de cette analyse, une petite surface à saturation (cas de l'eau libre) située dans un environnement quelconque est toujours dans la situation d'un effet d'oasis (cas *c*)).

II. — Évaporation d'une petite surface saturée et située dans un environnement plus sec : expression du coefficient d'échange apparent $h_1(U)$ en fonction de μ

Dans une étude antérieure concernant l'advection appliquée à l'évaporation d'une surface contrastée par rapport à l'extérieur (sol humide au sein d'une région sèche ou inversement) (Itier et Perrier, 1976*a* et *b*), on a pu définir l'évolution de l'évaporation entre zone sèche et zone humide. Selon ce schéma théorique, l'évaporation ponctuelle est donnée par :

$$E = ETR + 0{,}89 \left(\frac{x}{z_0}\right)^{-0{,}19} k U_* \Delta C_s \qquad (6)$$

formule dans laquelle

ETR est l'évapotranspiration réelle de la zone extérieure,
x la distance du point considéré comptée dans le sens du vent à partir de la transition entre zone sèche et zone humide,
z_0 la rugosité de l'ensemble de la zone,
k la constante de Von Karmann,
U_* la vitesse de frottement de l'ensemble de la zone,
ΔC_s l'écart de concentration de vapeur d'eau à la surface entre la zone considérée et l'extérieur.

En outre, le calcul montre que l'évaporation moyenne d'une surface dont la longueur comptée dans le sens du vent est d, est égale à celle mesurée au point d'abscisse $x = d/3$

$$\left| \bar{E} \right|_0^d = ETR + 0{,}89 \left(\frac{d}{3\, z_0}\right)^{-0{,}19} k U_* \Delta C_s . \qquad (6\ bis)$$

Dans cette expression :

— l'évapotranspiration réelle de la zone environnante ETR sera donnée par l'équation (4), formule où le gradient de déficit de saturation (Ta — Tra) — (Ts — Trs) peut être remplacé (compte tenu de (5)) par (Ta — Tra) (1 — μ)

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} (Rn + \rho c_p\, h(U)\, (Ta - Tra)\, (1 - \mu)) \qquad (7)$$

— l'écart de concentration ΔC_s entre la surface humide (indice Δ_1) et la surface environnante plus sèche (indice Δ_2) s'écrit :

$$\Delta C_s = \frac{LM}{RT} P'(Trs_1 - Trs_2) \qquad (8)$$

Trs désignant les points de rosée au contact même des surfaces ; compte tenu du bilan d'énergie de ces deux surfaces (Perrier, 1975) (la surface humide étant supposée à saturation $Trs_1 = Ts_1$), on peut écrire :

$$Ts_1 - Trs_2 = \frac{\gamma}{P' + \gamma} (Ts_2 - Trs_2)$$

et compte tenu de (5)

$$Trs_1 - Trs_2 = \frac{\gamma\mu}{P' + \gamma} (Ta - Tra)$$

d'où

$$\Delta C_s = \frac{LM}{RT} P' \frac{\gamma\mu}{P' + \gamma} (Ta - Tra)\,. \qquad (8\ bis)$$

Ainsi la formule (6) donnant l'évaporation d'une petite surface humide devient [γ étant égal à $\rho c_p/(LM/RT)$]

$$E = \frac{P'}{P' + \gamma} \left(Rn + \rho c_p \left(h(U)\, (1 - \mu) + 0{,}89 \left| \frac{d}{3\, z_0} \right|^{-0{,}19} k U_* \mu \right) (Ta - Tra) \right) . \qquad (9)$$

En identifiant cette équation avec celle de Penman appliquée à une petite surface humide :

$$E = \frac{P'}{P' + \gamma} \left(Rn + \gamma (LM/RT)\, h_1(U)\, (Ta - Tra) \right) \qquad (10)$$

où $h_1(U)$ est le coefficient d'échange apparent relatif à la surface humide et, dans la mesure où le coefficient d'échange de la zone environnante h(U) est mis sous la forme classique du type $kU_*/\text{Log}\ z/z_0$ avec z la hauteur de mesure des grandeurs climatiques et z_0 la rugosité de la surface, on écrira :

$$h_1(U) = k U_* \left(\frac{(1 - \mu)}{\text{Log}\ z/z_0} + 0{,}89 \left| \frac{d}{3\, z_0} \right|^{-0{,}19} \mu \right) . \qquad (11)$$

Le coefficient d'échange apparent $h_1(U)$ de la petite surface humide considérée dépend donc des grandeurs calculables suivantes :

— la vitesse de frottement U_* de la zone ou en première approximation la vitesse du vent U en posant $U_* = cU$ avec $c \sim 0{,}06$,

— le coefficient μ de déséquilibre hydrique entre la surface environnante et l'air,

— les caractéristiques de la zone telles que sa rugosité z_0, la hauteur de référence z et la dimension d de la petite zone humide analysée.

Rappelons que cette analyse est basée sur l'hypothèse d'une zone aérodynamiquement homogène et définie (même rugosité z_0 de la surface humide et environnante et même relation $U_* = cU$). Dans ces conditions, cette expression peut être calculée à partir de la mesure de la vitesse du vent U, des températures Ta et Tra de l'air, de la température de surface et de l'humidité de la zone environnante Ts et Trs.

III. — Expression du coefficient β en fonction de μ

Il est naturellement aisé de passer théoriquement de l'expression du coefficient d'échange apparent $h_1(U)$ (relation (11)) à la définition du coefficient β qui a été défini comme le rapport de ce coefficient à $h_0(U)$ la fonction du vent de Penman. Ainsi, le coefficient β, relatif à une surface humide assez petite par rapport à la zone environnante, n'est pas seulement une fonction du vent mais du facteur de déséquilibre μ introduit ci-dessus (§ I)

$$\beta = F(U)\,(n\mu + m)\,. \qquad (12)$$

Le tableau 1 donne d'une part les valeurs de la fonction F(U) dans le cas simple où la constante c vaut pour une surface de gazon ou un sol nu 0,06 ($c = U_*/U$) et d'autre part différentes valeurs des coefficients n et m selon la rugosité z_0 et la dimension d de la surface humide.

TABLEAU 1

Valeurs de la fonction F(U)

U (m s^{-1})	1	2	3	4	5	6	∞
F(U) ($c \sim 0{,}06$)	3,82	5,66	6,74	7,45	7,96	8,33	11,11

Valeurs des coefficients m et n

z_0	10^{-4} m	10^{-3} m	10^{-2} m	10^{-1} m
m ($\forall d$)	0,10	0,13	0,19	0,33
n (d = 1 m)	0,09	0,17	0,27	0,38
n (d = 10 m)	0,02	0,06	0,11	0,13
n (d = 100 m)	— 0,02	— 0,01	0,00	— 0,03

Il résulte de la relation précédente (12) et des valeurs du tableau 1 que le coefficient β :

— est une fonction rapidement croissante de la vitesse du vent pour des faibles valeurs de U mais tend vers une valeur maximum ;

— est aussi une fonction croissante (pour d suffisamment petit) du facteur de déséquilibre hydrique μ qui croît avec la sécheresse de la surface environnante. Notons cependant (tabl. 1) que plus la surface humide considérée est grande (d grand) et moins elle est dépendante de ce facteur μ caractéristique de l'environnement. En fait, mais ceci sort du cadre strict de l'étude entreprise ici, la fonction $(n\mu + m)$ qui est croissante en fonction de μ pour d petit, en devient indépendante ($n \sim 0$), puis en devient même une fonction décroissante ($n < 0$) pour de grandes surfaces ($d > 100$). Ceci est dû aux modifications progressives des conditions microclimatiques au-dessus de la surface (surtout pour d grand) et a été largement discuté à travers les écarts entre l'évapotranspiration d'une petite surface et celle donnée par la relation de Penman dans le cas de deux zones contrastées (Itier et Perrier, 1976*b*) ;

— est, compte tenu de ce qui précède, fonction décroissante de la dimension de la surface humide considérée ;

— est fonction croissante de la rugosité de la surface.

IV. — Essai de validation : calcul de μ à partir de β dans un cas particulier

L'expression de β donne des évolutions conformes à l'expérience (Mukammal et Neumann, 1977), mais en toute rigueur, ne pourrait être extrapolée au cas d'un bac, surtout du bac « classe A », dans la mesure où l'hypothèse fondamentale d'homogénéité n'est pas respectée.

En effet, avec une telle surface de référence, surélevée par rapport à la zone avoisinante, il est difficile de formuler les apports convectifs bien qu'une certaine compensation puisse s'effectuer entre l'accroissement de turbulence dû à la position du bac et l'effet de protection dû au rebord et à la moindre rugosité de l'eau.

En fait, en passant outre à cette difficulté, l'application de la relation théorique aux données du bac « class A » (tabl. 2) donne certes des valeurs du facteur de déséquilibre μ différentes selon les valeurs moyennes de z_0 et c (U_*/U) admises pour le bac et son environnement, mais conduit aussi à des valeurs très satisfaisantes, en particulier pour la combinaison la plus probable $c = 0{,}06$ et $z_0 = 10^{-3}$. Dans tous les

TABLEAU 2

Valeurs saisonnières du coefficient β et du facteur de déséquilibre hydrique μ

Values of β and of the equilibrium factor μ for the dry and wet seasons

	Saison sèche ($\bar{U} = 3{,}7$)	Saison humide ($\bar{U} = 3{,}3$)
β	2,7	2,0
$\overset{\mu}{(c = 0{,}06 ; z_0 = 10^{-3})}$	1,45	0,95
$\overset{\mu}{(c = 0{,}06 ; z_0 = 10^{-2})}$	0,70	0,35

cas, le facteur de déséquilibre hydrique μ marque bien une nette diminution en saison humide, ce à quoi on pouvait s'attendre, confirmant le rôle de ce facteur dans le coefficient d'échange apparent d'une petite surface (Riou, 1975).

Conclusion

La comparaison de l'évapotranspiration calculée par la formule de Penman avec celle d'une surface de référence saturée en eau est une pratique courante et très utile. Nous avions montré comment le rapport entre ces deux évaporations dépendait de deux termes : l'un, calculable à partir des données climatiques, $\alpha(1 - HR)$, et l'autre β, lié au rapport des coefficients d'échange, celui apparent de la surface de référence et celui utilisé dans la formule de Penman. L'introduction d'un facteur mesurable de déséquilibre hydrique μ entre la surface environnante et l'air ambiant, jouant le rôle d'indice d'aridité, permet alors une analyse du coefficient β dans un cas général d'une surface humide située au milieu d'une zone homogène. L'expression de β permet de prévoir ses variations et d'en estimer les valeurs dans la plupart des conditions, même celles apparemment très éloignées des hypothèses strictes de base servant à l'analyse théorique. C'est le cas du bac « class A », situé sur une zone donnée de caractéristiques aérodynamiques différentes et qui, malgré sa position et sa forme particulière, répond aussi en première approximation à l'analyse faite. En effet, les données expérimentales du rapport entre l'évapotranspiration potentielle calculée (formule de Penman) et l'évaporation du bac « class A » dont une première analyse avait été faite, s'ajustent bien aux expressions établies de β et du facteur hydrique de déséquilibre μ. Cette analyse doit donc permettre une étude pratique, quels qu'en soient le lieu et les particularités climatiques, des rapports souvent établis entre évapotranspiration calculée et mesurée.

Reçu pour publication en septembre 1979.

Summary

Ratio between calculated potentiel evapotranspiration and pan evaporation

II. — *Expression as a function of an equilibrium factor between evaporating surfaces and air*

We showed in the previous paper how the ratio between evapotranspiration calculated by Penman's formula, ETP_c, and evaporation from pan, E_{bac} (class A), may be expressed in function of climatic data (radiation, air temperature, wind, relative humidity). In the specific case of « Haute-Volta », this theoretical expression leads to a relation only function of the relative humidity and a coefficient β, the ratio between the exchange coefficient of the pan $[h_b(U)]$ and the wind function used in Penman's formula $[h_o(U)]$. In this situation, the simplified relation obtained (relation (3)) was shown in good agreement with experimental results given furthermore (relation (2)).

With the presented definition of a coefficient μ (relation (5) and fig. (1)) which expresses the state of non-hydric equilibrium between the surrounding surfaces and the air, and with an exchange coefficient for pan $h_b(U)$ calculated for a small natural surface inside the homogeneous but dryer surrounding $h_1(U)$, it is possible to demonstrate how this exchange coefficient may be expressed in function of μ (relation (11)). So, the coefficient β (relation (12) and table 1) and of course the ratio ETP_c/E_{bac} appear as a definite function of μ. Such a result allows to have a complete analysis of this ratio versus climatic data and the coefficient μ which may be measured or estimated.

In another and reversed way, starting from values of β obtained by comparison between theoretical relation and experimental data (relation (3)), it was possible to state in this particular case values of μ. The variation of μ found between the two seasons (table 2) underlines an oasis effect more pronounced during the dry season and corresponds to an expected natural variation.

Zusammenfassung

II. — *Ausdruck in Abhängigkeit von einem hydrischen Ausgeglichenheits faktor zwischen den Verdunstungsflächen und der Luft.*

Wir haben vorhergehend gezeigt, auf welche Weise die Beziehung der nach der Formel von Penman (ETP_c) errechneten potentialen Verdunstung und der Verdunstung am Versuchsbehälter (bac) (E_b) in Abhängigkeit der klimatischen Gegebenheiten (Strahlung, Temperatur, Wind, relative Feuchtigkeit) ausgedrückt werden kann. In dem speziellen Fall des Ober-Voltagebietes führt dieses theoretische Verhältnis zu einem Ausdruck in ausschliesslicher Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit HR und eines Koeffizienten β, der das Verhältnis des auf den Versuchsbehälter bezüglichen Austauschkoeffizienten [$h_b(U)$] mit der in der Formel von Penman benützten Funktion des Windes ausdrückt. In diesem Falle stimmte die gefundene vereinfachte Formel (Gleichung 3) in überein mit dem experimentalen, anderswo dargestellten Ergebnis (Gleichung 2).
Zurückkommend auf die Signifikanz eines Koeffizienten μ (Gleichung 5 und Abbildung 1), welcher den hydrischen Ausgeglichenheitszustand zwischen den Verdunstungsflächen und der Luft, und nach Gleichstellung des Koeffizienten $h_b(U)$ mit dem Austauschkoeffizienten $h_1(U)$ einer kleinen, natürlichen und homogenen aber feuchteren Fläche als der umliegende Bereich, wird gezeigt, dass der Koeffizient $h_b(U)$ in Abhängigkeit von μ (Gleichung 11) ausgedrückt werden kann. Davon ausgehend, erscheinen der Koeffizient β (Gleichung 12 und Tabelle 1) und, durch Folgesatz, das Verhältnis ETP_c/E_{bac} (bac = Versuchsbehälter) auch als Funktion von μ. Dieses Ergebnis ermöglicht sodann eine vollständige Analyse des Verhältnisses ETP_c/E_{bac} in Abhängigkeit von den Klimadaten und den messbaren oder abschätz baren Koeffizienten μ.
Übrigens auf umgekehrte Weise, von den numerischen Werten ausgehend, die man für β durch Vergleich zwischen Theorie und Experiment erreichen kann (Beziehung 3), war es möglich in diesem speziellen Falle, die Werte dieses Koeffizienten μ genauer zu bestimmen. Die so zwischen zwei Jahreszeiten gefundene Schwankung von μ (Tabelle 2) unterstreicht einen ausgeprägteren Oasiseffekt während der trockenen Jahreszeit und entspricht gut der gemachten Annahme.

РЕЗЮМЕ

Соотношение между рассчитанной потенциальной эвапотранспирацией и эвапотранспирацией измеряемой при помощи бака.

II. — Выражение соотношения между испаряющими поверхностями и воздухом, в зависимости от фактора гидрической неуравновешенности.

ПЕРРЬЕ А., АЛЛЕР М.

В пред'идущей работе показано как соотношение между потенциальной эвапотранспирацией, рассчитанной по формуле Пенмана (ETP_c) и эвапотранспирацией измеренной с помощью бака, выражается в зависимости от климатических условий (излучения, температура, ветер, относительная влажность). В частном случае Высокой Вольта это теоритическое соотношение приводит к формуле, зависящей исключительно от относительной влажности (HR) и коэффициента β, выражающих соотношение между коэффициентом относительного обмена в баке [$h_b(U)$] и функцией ветра, применяемой в формуле Пенмана. В этом случае, найденная упрощенная формула (уравнениез) соответствует представляемым результатам экспериментов (урав нение 2).

Напомнив значение коэффициента μ (уравнение 5 и рис. 1), выражающего состояние гидрической неуравновешенности между испаряющими поверхностями и воздухом, и приравняв коэффициент $h_b(U)$ с коэффициентом обмена $h_1(U)$ небольшой природной и гомогенной поверхности более влажной чем ее окружение, доказывается что коэффициент $h_b(U)$ может получить выражение в зависимости от μ (уравнение 12 и таблица 1), вследствии чего соотношение ETP_c/E_{bac} будет также зависеть от μ.

Этот результат позволяет провести полный анализ соотношения ETP_c/E_{bac}, в зависимостиот климатических данных и коэффициента μ поддающегося измерению и оценке.

И наоборот, исходя от цифровых величин получаемых для β при сравнении между теорией и практикой (формула 3), можно определить величины коэффициента μ в этом частном случае. Изменения в течении двух сезонов значений полученного таким образом μ (таблица 2) подчеркивают эффект оазиса, усиливающийся во время сухого сезона, и хорошо совпадают с предподкладками.

Références bibliographiques

BALDY Ch., 1978. Utilisation d'une relation simple entre le bac classe A et la formule de Penman pour l'estimation de l'E. T. P. en zone soudano-sahélienne. *Ann. agron.*, **29** (5), 439-452.

ITIER B., PERRIER A., 1976*a*. Présentation d'une étude analytique de l'advection. I : Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température. *Ann. agron.*, **27** (2), 111-140.

ITIER B., PERRIER A., 1976*b*. Présentation d'une étude analytique de l'advection. II : Application à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration. *Ann. agron.*, **27** (4), 417-433.

MUKAMMAL E. I., NEUMANN H. H., 1977. Application of the Priestley-Taylor evaporation model to assess the influence of soil moisture on the evaporation from a large weighting lysimeter and class A pan. *Bound. Layer Meteorol.*, **12** (2), 243-296.

PENMAN H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceed. Roy. Soc. London*, A, **193,** 129-145.

PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. — Evaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Ann. agron.*, **26** (1), 1-18.

PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. II. — Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince ». *Ann. agron.*, **26** (2), 105-123.

PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. — Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, **26** (3), 229-243.

PERRIER A., HALLAIRE M., 1979. Relation entre l'évapotranspiration potentielle calculée et l'évaporation mesurée sur bac. I. — Justification d'une relation expérimentale obtenue en zone tropicale. *Ann. agron.* (sous presse).

RIOU Ch., 1975. *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale.* Mémoire O. R. S. T. O. M. nº 80, 236 p.

Ann. agron., 1979, **30** (4), 347-361

Evaporation du sol nu en zone semi-aride et en conditions hivernales. Relations avec l'albédo et la température de la surface du sol

CH. RIOU (1), J. P. LAGOUARDE (2) et R. CHARTIER (3)

(1) *Laboratoire de bioclimatologie, I. N. A. de Tunisie* 43, *avenue Ch. Nicolle, Tunis*
(2) *Institut agricole de Medjez-el-Bab, Tunis*
(3) *Mission O. R. S. T. O. M. de Tunisie, section hydrologie* 18, *avenue Ch. Nicolle, Tunis*

Résumé

L'évaporation d'un sol nu dans le Sud Tunisien au mois de novembre, est mesurée après une pluie, ainsi que son albédo, sa température de surface et celle d'une parcelle maintenue humide par irrigation.

Les mesures font apparaître une chute rapide de l'évaporation par rapport à l'évaporation potentielle, malgré l'existence d'une réhumectation nocturne.

L'albédo, très sensible d'abord, évolue ensuite lentement et rend mal compte des derniers stades du dessèchement du sol. L'écart entre les températures de surface des deux parcelles suit par contre fidèlement la chute de l'évaporation et peut donc être considéré comme un bon témoin de ce phénomène.

Introduction

Le problème de l'évaporation du sol nu est intéressant à plus d'un titre : les conditions hydriques et thermiques de la couche superficielle du sol interviennent dans la germination des graines, la diffusion des engrais ou pesticides, la réaction du sol à la pluie, l'importance relative enfin des flux de chaleur et de vapeur d'eau qui commandent l'économie de l'eau du sol.

En zone méditerranéenne, et en particulier dans le Sud Tunisien où de vastes espaces n'ont pendant de longues périodes ou en permanence qu'un taux de couverture végétale faible ou nul, l'évaporation remet en circulation dans le cycle de l'eau une fraction de la pluie ; l'importance de cette fraction conditionne les possibilités de développement de la végétation et de l'alimentation des nappes.

Quelques études ponctuelles ont été effectuées sur ce sujet ; leur multiplication dans l'espace est difficile, aussi, espère-t-on actuellement des techniques de télédétection, des renseignements utilisables.

Dans ce travail (1), nous avons étudié, dans la région de Gabès (Sud Tunisien), l'évolution de l'évaporation d'un sol nu après une pluie au mois de novembre ; nous avons également suivi corrélativement l'évolution de deux paramètres de surface susceptibles d'être liés au phénomène évaporatoire : l'albédo et la température de la surface du sol.

Dispositif expérimental

Le site choisi se trouve à 16 km au Nord-Ouest de la ville de Gabès (33° 55′ Nord-9°58′ Est, 180 mm de pluie par an), au sein d'une zone à très faible couverture végétale. Le sol est du type « Sierozem » relativement homogène sur les 90 premiers centimètres, de texture sablo-limoneuse et de faible rétention d'eau (environ 0,12 cm^3 d'eau/cm^3 de sol).

L'évaporation est mesurée par deux méthodes : méthode du bilan d'énergie et calcul des transferts turbulents. A cet effet sont mesurés et enregistrés de façon systématique :

- les rayonnements global, réfléchi, atmosphérique, le rayonnement net ;
- les températures et pressions de vapeur d'eau aux niveaux 4 et 118 cm ;
- les vitesses du vent aux niveaux 22 - 32 - 56 - 100 - 200 et 400 cm ;
- les températures du sol aux profondeurs 0 - 2 - 4 - 7,5 - 14 - 27 - 51 et 100 cm.

— Les mesures de rayonnement sont effectuées à l'aide d'une pile au silicium pour le rayonnement global, d'une pile thermoélectrique de Kipp (rayonnement réfléchi), et de deux pyrradiomètres différentiels (Swissteco, Type S 1).

— Les températures et pressions de vapeur d'eau sont obtenues à l'aide de capteurs composés chacun de trois thermocouples cuivre-constantan en série, placés dans des tuyères doubles avec aspiration ; certains de ces capteurs sont humectés en permanence par une fine mousseline avec alimentation d'eau continue (2) (mesure de la température « humide »).

— Les températures à l'intérieur du sol sont obtenues par thermocouples, la soudure froide commune étant placée à 1 m dans le sol. Les températures de surface sont mesurées directement à partir de thermocouples cuivre-constantan incorporés à des très fines pastilles de papier placées à la surface du sol et recouvertes d'une très mince couche du sable superficiel. Le dispositif comporte trois fois trois capteurs mis en série, ce qui donne en fait neuf points de mesure répartis sur le site ; la soudure « froide » est placée à 1 m dans le sol et sa température, pratiquement constante au cours d'une journée, vérifiée plusieurs fois par jour (3). Les valeurs ainsi obtenues ont été comparées à celles qui sont fournies par d'autres méthodes, notamment par la radiothermométrie infrarouge, et donnent entièrement satisfaction.

Le flux de chaleur dans le sol est donc déterminé à partir des profils thermiques successifs, la chaleur spécifique du sol étant obtenue *in situ* en moyenne par comparai-

---

(1) Effectué dans le cadre d'une ATP-CNRS n° 651-2337.

(2) Ce dispositif a été décrit en détail dans : Ch. Riou. *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale*. Mémoire ORSTOM n° 80, 1975.

(3) On trouvera une description détaillée de la mesure des températures de surface dans la thèse de Docteur-Ingénieur de J. P. Lagouarde. Université de Grenoble, juillet 1979.

son de nuit du flux thermique du sol et du rayonnement net, pendant des périodes sans vent. Ce type de mesure nous a paru préférable à l'utilisation des fluxmètres.

La méthode du transfert turbulent est ici simplifiée par une instabilité souvent faible et des profils de vent logarithmiques (paramètre de rugosité : 0,5 à 0,6 cm) ; comparée dans ce cas à celle du bilan d'énergie, elle a fourni un très bon accord. Les résultats dont il sera fait état ici sont ceux obtenus par cette dernière méthode.

Toutes les mesures sont enregistrées dans une centrale à quarante-huit voies. Le pas de temps étant de 3 min.

Pendant le dessèchement du sol (parcelle 1), une parcelle de 20 m² (parcelle 2) est maintenue humide par des irrigations fréquentes (2 à 4 fois par jour). Les mesures de température de surface sont répétées sur la parcelle 2 par un dispositif analogue à celui de la parcelle 1.

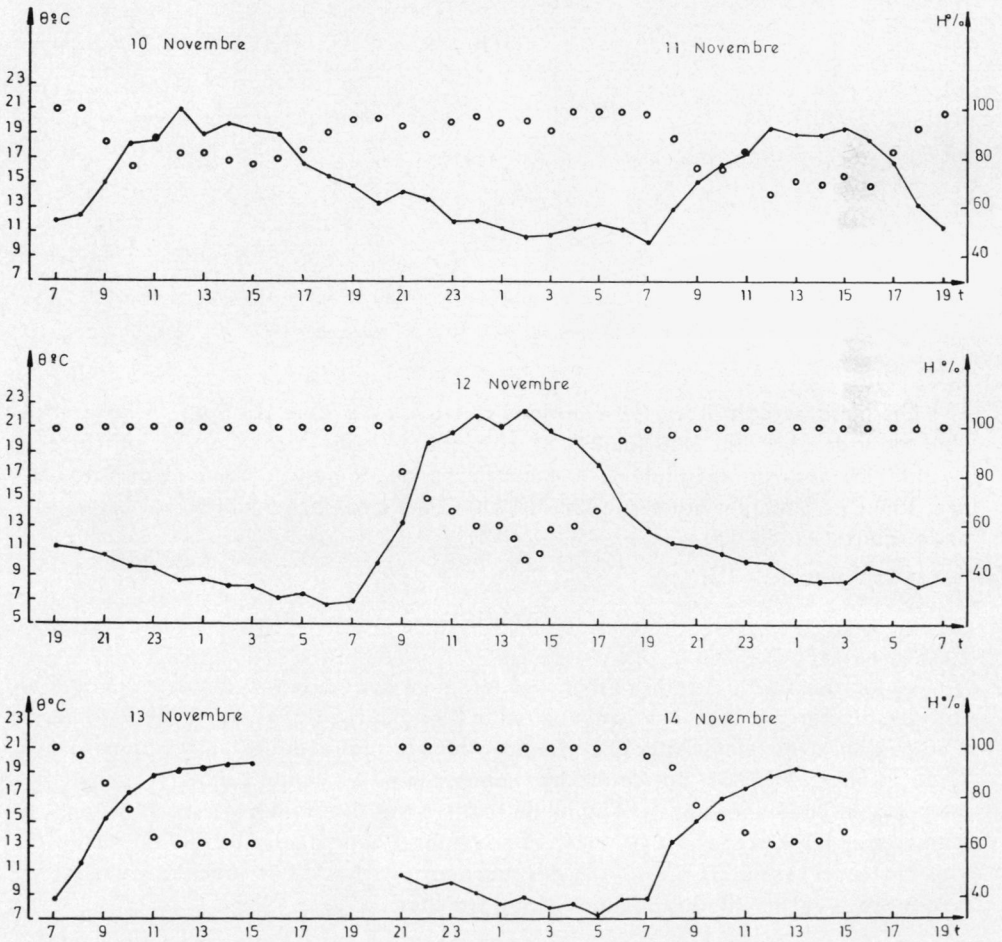


FIG. 1. — *Température de l'air et humidité relative* (1,18 m) *du* 10 *au* 14 *novembre* 1978
(θ ●—● *température* ; H : ○, *humidité relative*).

Temperature and relative humidity of air (1,18 m) *from* 10 *to* 14 *November* 1978
(θ ●—● *temperature* ; H : ○, *relative humidity*).

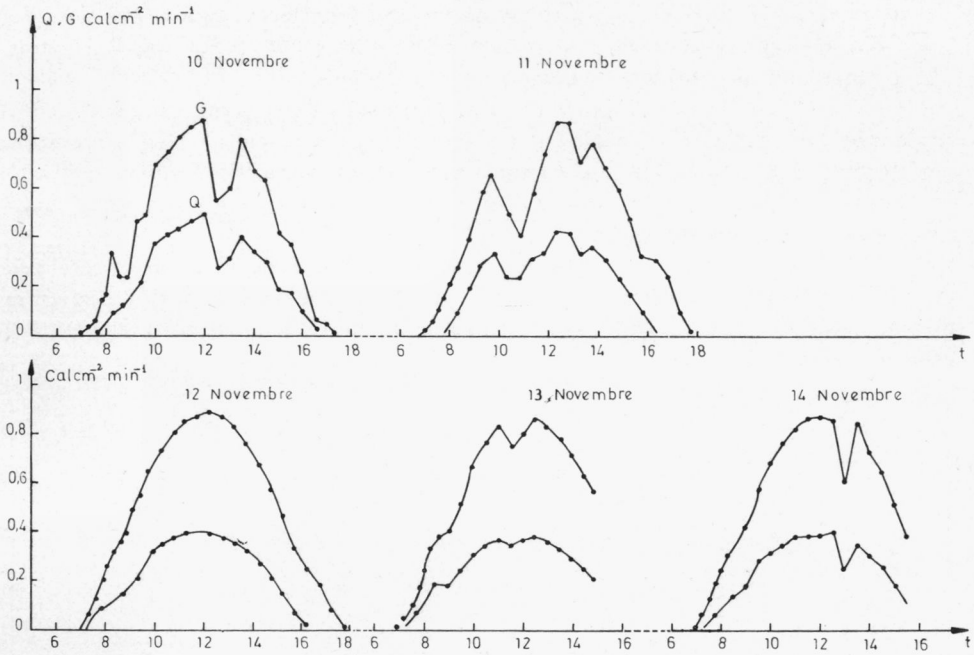


FIG. 2. — *Rayonnement global et rayonnement net du* 10 *au* 14 *novembre* 1978.
Global and net radiations from 10 *to* 14 *November* 1978.

Les mesures dont il est fait état dans ce travail ont duré du 5 au 14 novembre. Une pluie de 51,2 mm était tombée le 30 octobre, mais le sol était sec en surface. Pendant les mesures, une pluie de 10,4 mm s'est produite dans la nuit du 8 au 9 novembre, suivie de quelques gouttes le 9 vers 11 h. C'est le dessèchement du sol après cette pluie, qui est étudié ici.

Résultats

La journée du 9 novembre est particulièrement nuageuse (rayonnement global de 157 calories cm $^{-2}$ jour $^{-1}$ environ) et humide (l'humidité relative est restée supérieure à 80 p. 100), avec quelques gouttes de pluie dans la matinée. Les autres journées (du 10 au 14 novembre) sont par contre très comparables, en ce qui concerne le rayonnement global, la température et l'humidité relative (fig. 1 et 2). La vitesse du vent est la même pour les journées du 10, 11 et 13 novembre, nettement plus faible pour le 12, plus élevée le 14 (fig. 3). Ce sont là des journées proches d'une journée moyenne de novembre, légèrement plus humides et plus fraîches.

Evolution de l'évaporation

Les valeurs de l'évaporation E obtenues pour des intervalles de temps successifs d'une demi-heure sont indiquées sur la figure 4. Pour comparer ces valeurs à celles

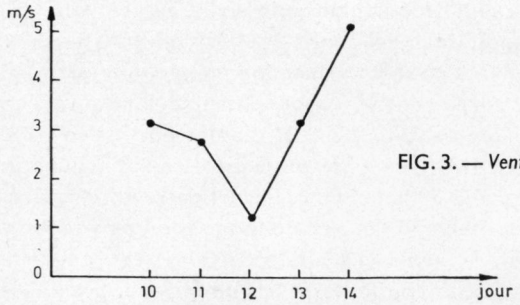


FIG. 3. — *Vent moyen diurne à* 2 m *du* 10 *au* 14 *novembre.*
Wind velocity (2 m).

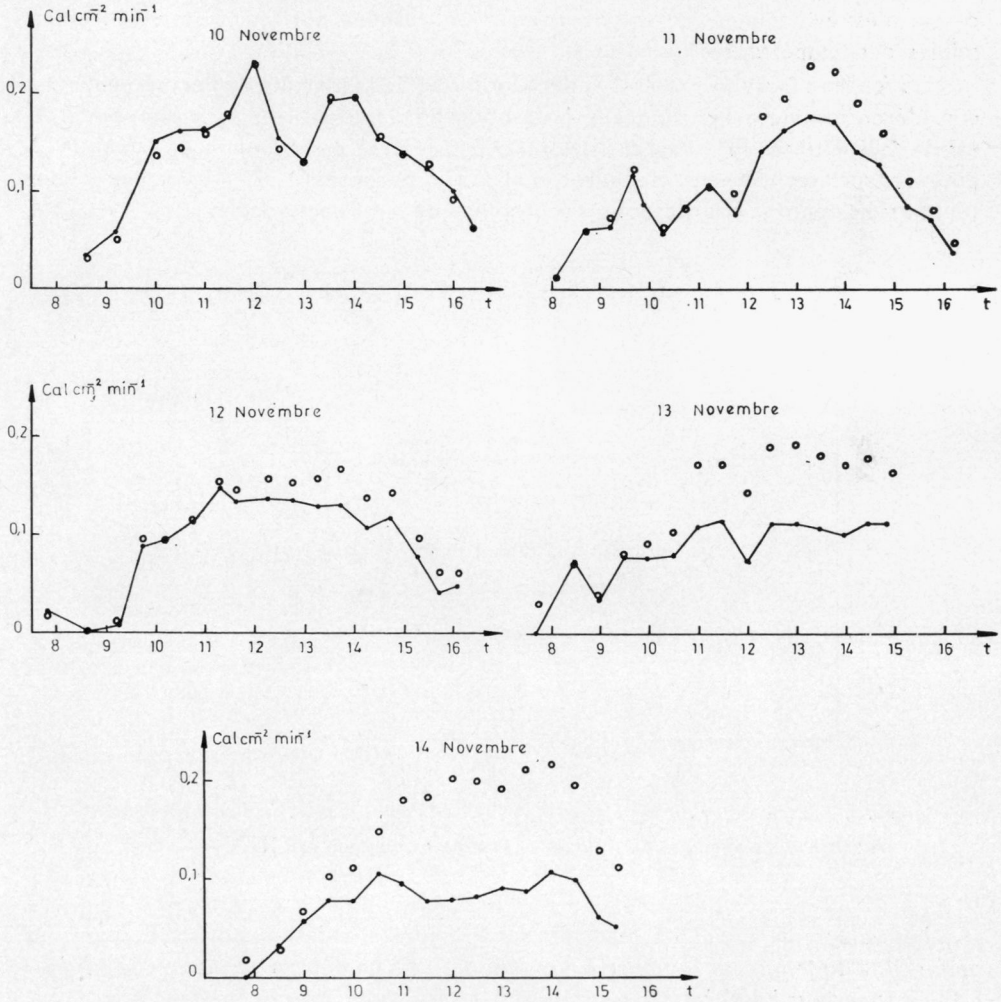


FIG. 4. — *Evaporation du sol nu après la pluie du* 8 *au* 9 *novembre* (•—•) ; o : *valeurs de* $(\delta/\delta + \gamma)$ $(Q_H - S)$ *calculées pour une surface irriguée.*
Evaporation of the bare soil after the rain (8th *and* 9th *of November*) •—• ; o : *values of* $(\delta/\delta + \gamma)$ $(Q_H - S)$ *calculated for a wet surface.*

d'une fonction de référence, proche de l'évaporation potentielle, nous avons calculé, pour les mêmes intervalles de temps, la fonction $E_r = (\delta/\delta + \gamma)\ (Q_H - S)$ *. Q_H représente la valeur du rayonnement net pour la surface maintenue humide, d'albédo 0,28 ; cette valeur est obtenue en corrigeant le rayonnement net mesuré pour la parcelle 1, d'une part en tenant compte de son albédo a, d'autre part de sa température superficielle θ_s, les corrections étant G(a — 0,28), où G est le rayonnement global, et $\varepsilon\sigma\theta^3(\Delta\theta)_s$, où ε est l'émissivité du sol (0,94 ici) et $(\Delta\theta)_s$ l'écart entre les températures de surface des parcelles 1 et 2. δ représente la dérivée de la pression de vapeur d'eau saturante en fonction de la température, prise ici pour la moyenne des températures de l'air et de la surface humide ; γ est la constante psychrométrique. S enfin, est le flux de chaleur dans le sol, que nous avons supposé identique pour les deux parcelles, ce qui n'est évidemment qu'une approximation, justifiée par les écarts relativement faibles des températures de surface.

La fonction E_r qui représente le premier terme de la formule de Penman peut être considérée comme proportionnelle à l'évaporation potentielle E_p ; le rapport E_p/E_r est de 1,28 d'après Priestley et Taylor (1972), de 1,27 pour Davies et Allen (1973) pour des surfaces cultivées, et Jackson *et al.* (1976) proposent 1,37 $\pm$ 0,08. Ces valeurs sont parfois données pour les totaux journaliers où S est négligeable.

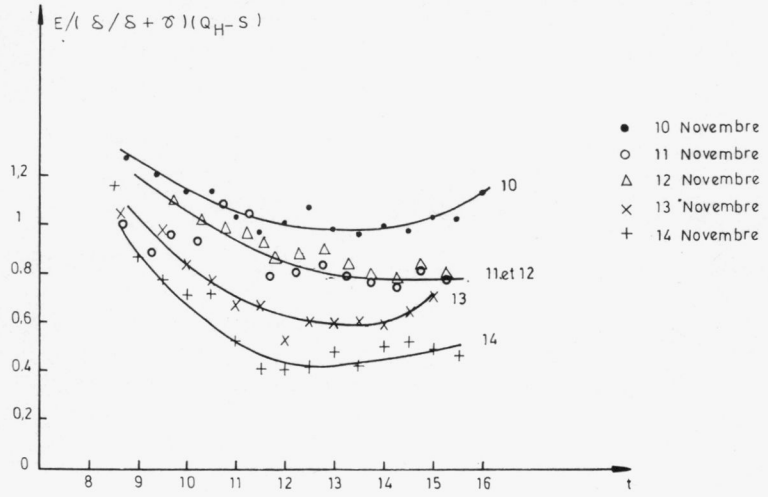


FIG. 5. — *Evolution du rapport* $E/(\delta/\delta + \gamma)\ (Q_H - S)$ *après la pluie du* 8 *au* 9 *novembre.*
Variation of the ratio $E/(\delta/\delta + \gamma)\ (Q_H - S)$ *after the rain* (8th *and* 9th *of November*).

Les valeurs de E_r ont été reportées sur la figure 4, et les rapports E/E_r exprimés en fonction du temps sur la figure 5. On voit ainsi qu'en début de matinée, le rapport E/E_r est supérieur à 1 (1 à 1,3) ; ce rapport décroît ensuite pour augmenter légèrement en fin de journée, la décroissance étant de plus en plus accusée au fil des jours.

* La fonction E_r peut être appelée « évaporation à l'équilibre ». Table ronde de Budapest, 1977.

Variations de l'albédo

Les différentes mesures de l'albédo ont été indiquées sur les figures 6 et 6 *bis*. Il s'agit de moyennes établies sur des intervalles de temps de 15 min.

Le premier graphique de la figure 6 indique les variations de l'albédo avant la pluie du 9 novembre, soit les 5, 7 et 8 novembre. Au lever du jour, l'albédo est d'environ 0,28 puis augmente rapidement pour atteindre 0,35 vers 9 h. Il augmente ensuite

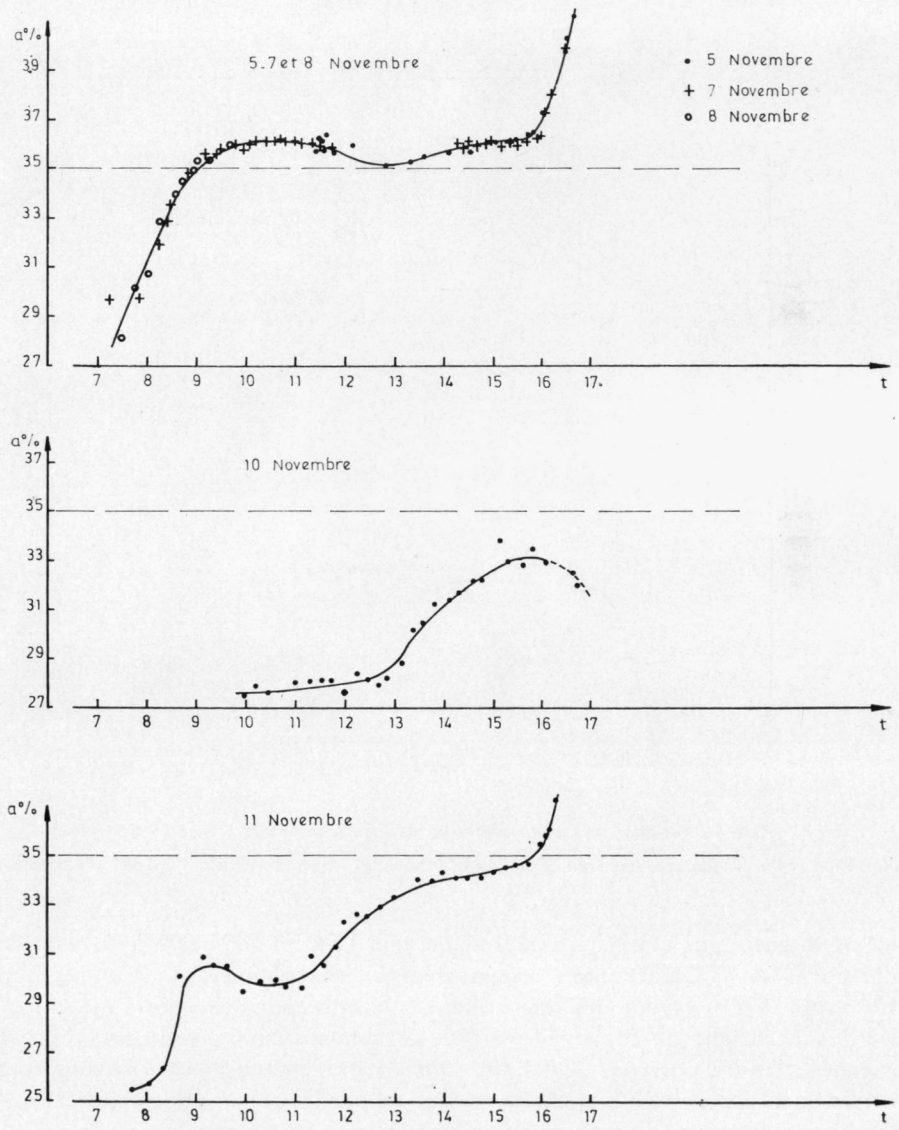


FIG. 6. — *Variation de l'albédo avant et après la pluie du 9 novembre (du 5 au 11 novembre).*

Variation of the albedo before and after the rain of the 9th of November (from the 5th to the 11th of November).

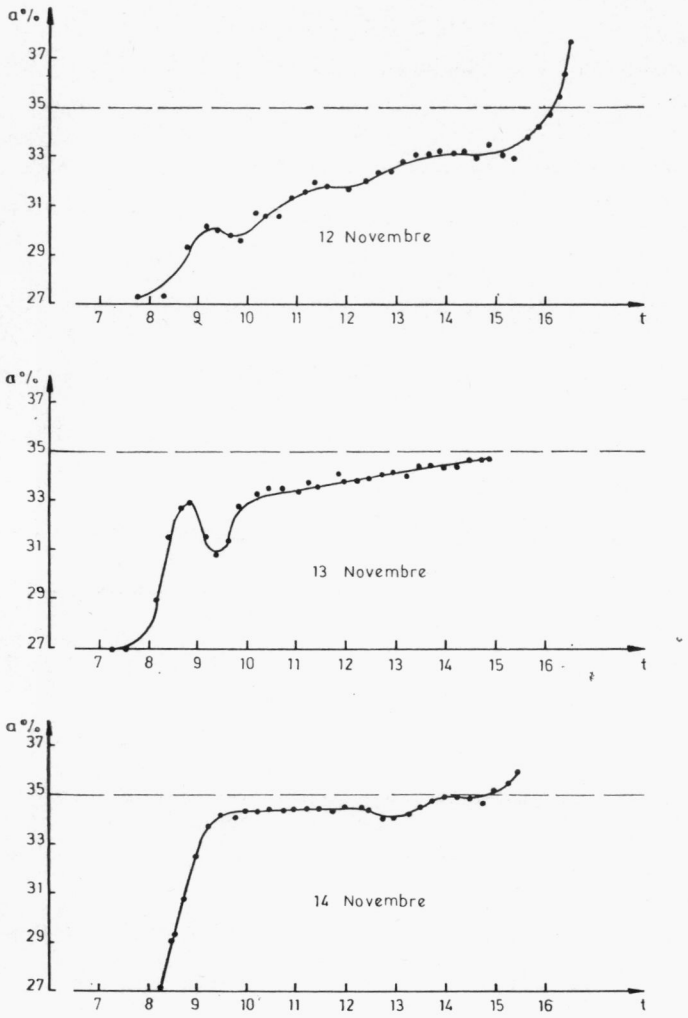


FIG. 6 *bis*. — ***Variation de l'albédo après la pluie du 9 novembre (12 au 14 novembre)***
Variation of the albedo after the rain of the 9th of November (from the 12th to the 14th of November).

lentement, passe par une légère dépression vers 12 h, et augmente à nouveau fortement après 16 h. Ces résultats comparables à ceux obtenus par d'autres auteurs (Idso *et al.*, 1974) peuvent être interprétés d'une part, par l'existence le matin d'une couche superficielle de sol humectée par les condensations nocturnes, rapidement desséchée, d'autre part, par l'effet sur l'albédo de l'inclinaison des rayons solaires sensible en fin de journée. Cet effet a été signalé par Idso *et al.* pour d'autres types de sols et ces auteurs ont pu « corriger » l'albédo pour le ramener à une valeur « normalisée » supprimant l'influence de la hauteur du soleil ; celle-ci ne dépasse guère ici, en novembre, 39° et une telle correction ne nous a pas paru nécessaire par la suite.

Les autres graphiques des figures 6 et 6 *bis* indiquent la variation d'albédo

pendant les journées qui suivent la pluie du 9 novembre. L'albédo qui est d'environ 0,27 le matin, augmente et atteint 0,35 avant la forte remontée d'après 16 h, sauf le 10 où il ne dépasse pas 0,33. Cette remontée se produit de plus en plus rapidement : la valeur 0,32 est atteinte le 10 à 14 h 30, le 11 et le 12 à 12 h, le 13 avant 10 h et le 14 avant 9 h. On note une curieuse dépression le matin, qui s'amorce après 9 h. Une hypothèse non vérifiée pourrait attribuer ce phénomène à l'influence d'un flux d'eau dirigé vers la surface, après l'évaporation de la rosée.

Températures de surface des parcelles irriguée et non irriguée

Les figures 7 et 7 *bis* montrent l'évolution de la température de surface pour la parcelle 1, en voie de desséchement, et la parcelle 2, maintenue humide. L'écart de

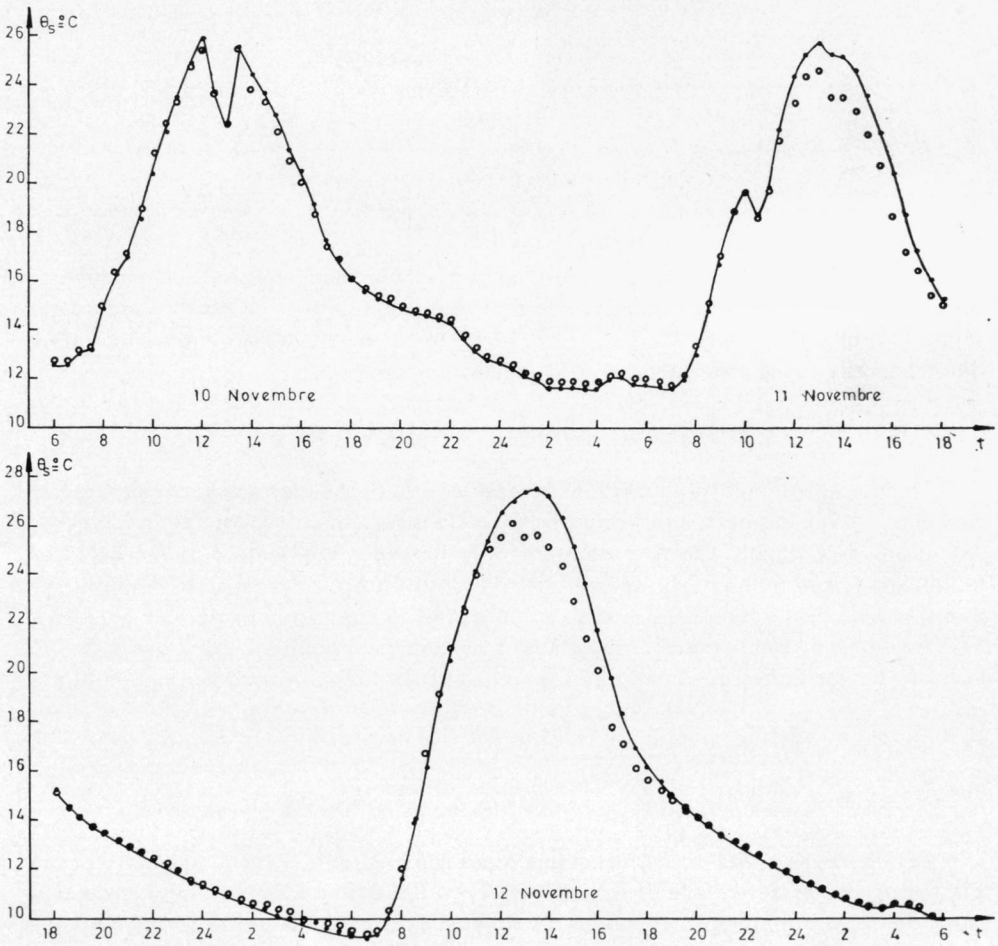


FIG. 7. — *Températures de surface* (10, 11 *et* 12 *novembre*) : *Parcelle* 1, *en voie de dessèchement* (•—•) ; *Parcelle* 2, *maintenue humide par l'irrigation* (○).

Surface temperature (10, 11 *and* 12 *November*) : (•—•) *Drying plot* (*plot* 1) ; (○) *Irrigated plot* (*plot* 2).

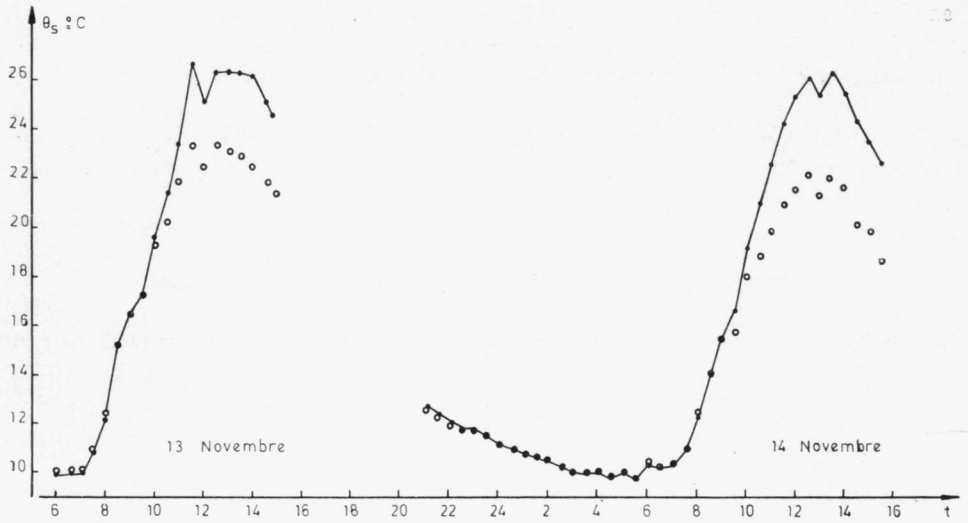


FIG. 7 *bis*. — *Températures de surface* (13 *et* 14 *novembre*) : *Parcelle* 1, *en voie de dessèchement* (•—•) ; *Parcelle* 2, *maintenue humide par l'irrigation* (○).

Surface temperature (13 *and* 14 *November*) : (•—•) *Drying plot* (*plot* 1) ; (○) *Irrigated plot* (*plot* 2).

température à un instant donné $(\Delta\theta)_s$ est nul ou faible le 10 novembre, où il ne dépasse pas 0,5 °C ; il augmente les jours suivants, et se produit de plus en plus tôt ; sa valeur maximum atteint 1,7 °C le 11, 2 °C le 12, 3,6 °C le 13, 4,2 °C le 14. Pendant la nuit les deux parcelles sont pratiquement à la même température.

Variation de l'albédo et rapport E/E_r

La comparaison entre l'albédo et le rapport E/E_r peut se faire à partir des figures 4, 6 et 6 *bis*. Sur la figure 8, le rapport E/E_r a été directement reporté en fonction des variations de l'albédo. On peut constater que l'albédo augmente d'abord de façon notable sans que le taux E/E_r ne soit affecté (10 novembre). Par la suite, l'augmentation d'albédo est de moins en moins rapide quand le rapport E/E_r décroît et le 13 et 14 novembre, on peut noter qu'au delà d'un certain seuil pour E/E_r, de l'ordre de 0,7, l'albédo ne varie pratiquement plus. Ces résultats sont différents de ceux obtenus par Idso *et al.*, qui sur un sol de limon, mettent en évidence une augmentation continue de l'albédo, après une irrigation.

Ecart des températures de surface des parcelles 1 *et* 2 *et rapport* E/E_r

Les figures 4, 7, et 7 *bis* montrent une assez remarquable coïncidence entre l'écart des températures de surface $(\Delta\theta)_s$ et l'écart E_r — E. La figure 9 met en évidence cette coïncidence, en montrant l'évolution du rapport E/E_r en fonction de $(\Delta\theta)_s$, pour des intervalles de temps successifs de 2 h ; cette décomposition est effectuée pour tenir compte du déphasage entre l'évaporation et la température de surface du sol. La variation obtenue est pratiquement linéaire et les différentes droites sont parallèles entre elles.

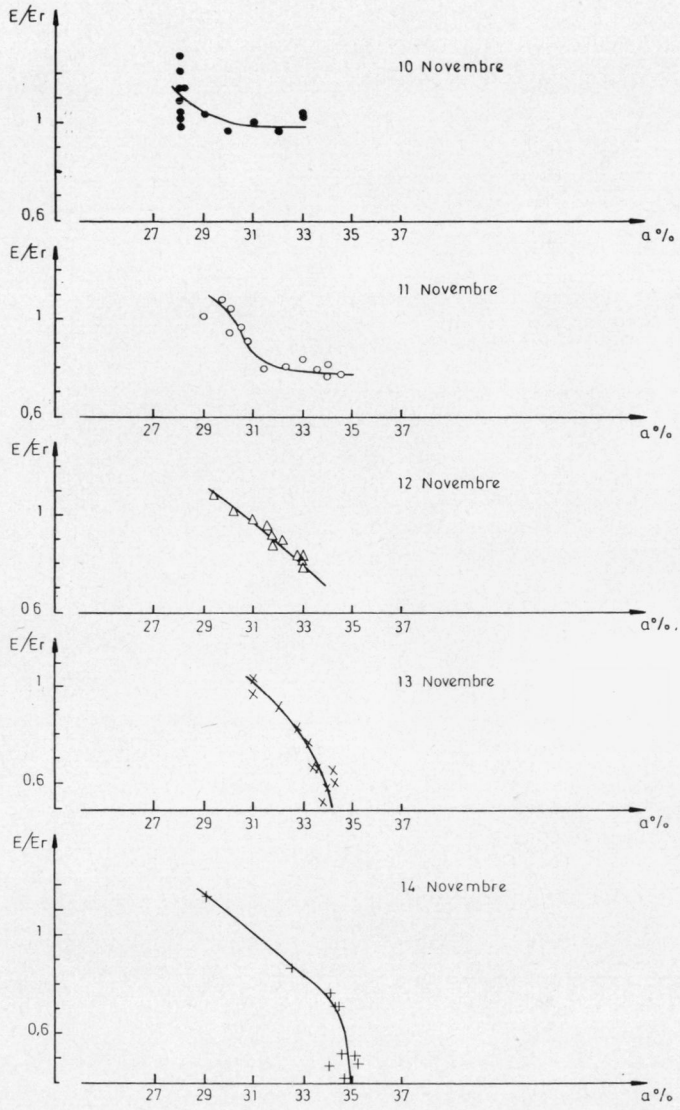


FIG. 8. — *Rapport* $E/(\delta/\delta + \gamma)$ $(Q_H - S)$ *et albédo, pour 5 jours suivant une pluie.*
Relations between the ratio $E/(\delta/\delta + \gamma)$ $(Q_H - S)$ *and the albedo, after a rain.*

Analyse des résultats

Le premier point notable est la chute d'évaporation sensible peu de temps après la pluie du 8 au 9 novembre. L'évaporation journalière qui est de 1,15 mm le 10, diminue les jours suivants (comparables au 10) et devient 0,86 mm le 11, 0,78 mm le 12, 0,66 mm le 13, 0,59 mm le 14. La figure 5 traduit de manière plus précise ce phé-

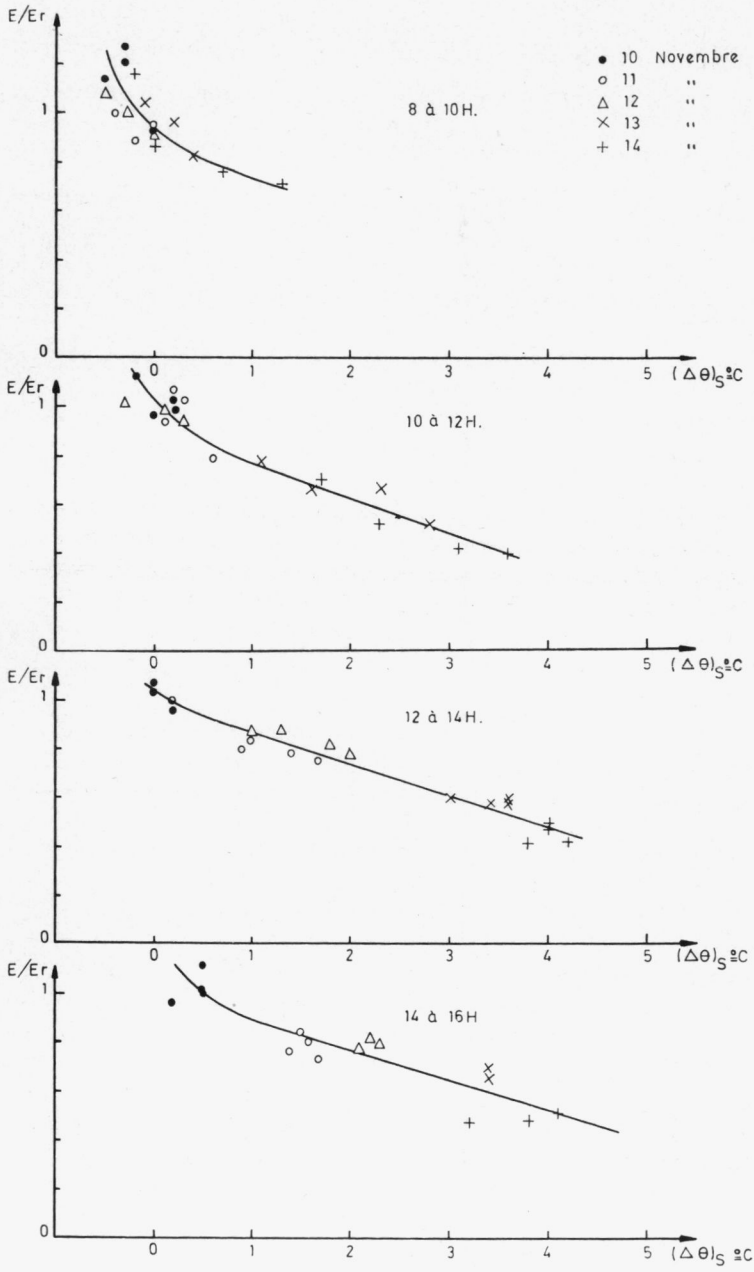


FIG. 9. — *Rapport* $E/(\delta/\delta + \gamma)$ $(Q_H - S)$ *et écart des températures de surface des parcelles* 1 *et* 2 (10 *au* 14 *novembre* 1978).

Relations between the ratio $E/(\delta + \delta + \gamma)$ $(Q_H - S)$ *and the surface-temperature differences of the plots* 1 *and* 2 (*from the* 10th *to the* 14th *November* 1978).

nomène, et l'on y voit le rapport E/E_r passer de 1 le 10 à 0,4 le 14, au milieu de la journée. Ainsi, bien que l'évaporation potentielle soit ici faible, un frein au dessèchement du sol se produit peu de temps après la réhumectation du sol par la pluie. Ceci est confirmé par les mesures effectuées le 8 novembre, soit 10 jours après la forte pluie de 51,2 mm enregistrée le 30 octobre, où pour une journée semblable à celles qui ont été étudiées ici, l'évaporation n'est plus que de 0,43 mm. On peut donc estimer qu'un tel sol nu ne perd en Novembre que de 6 à 7 mm en 10 jours. Il y a à Gabès en moyenne, à cette époque, 4 pluies par mois, totalisant 31 mm. Il n'est donc pas exclu, que même en année « normale », il puisse y avoir, en l'absence de végétation, une légère migration d'eau en profondeur.

Une autre remarque concerne la variation de l'albédo qui se reproduit chaque jour avec une même amplitude. On peut l'attribuer à la réhumectation du sol par les condensations nocturnes, mais les mesures faites avant la pluie, montrent que cet apport est rapidement dissipé (vers 9 h). Il faut donc admettre qu'il y a ici, à côté de la rosée, une augmentation du taux d'humidité de la tranche superficielle due à un flux ascendant. Ce phénomène a été également noté par idso *et al.* (1974) et des mesures fines effectuées par Bruce *et al.* (1977) l'ont mis en évidence. Il semble même, comme on l'a noté sans le vérifier, que ce flux reprend après la disparition de l'eau condensée. Idso *et al.*, Jackson *et al.* (1976) considèrent à partir de leurs résultats que la valeur de l'albédo peut être corrélée au taux d'humidité du sol en surface et donc à l'évaporation.

L'étude des variations d'albédo, telles qu'elles se produisent ici, montre que, sur un sol sableux à faible teneur en eau, l'albédo est un témoin peu satisfaisant du phénomène évaporatoire ; il varie rapidement quand le taux d'évaporation E/E_r s'abaisse légèrement, mais ensuite la sensibilité à la chute relative de l'évaporation diminue et devient presque nulle quand E/E_r tombe au-dessous de 0,7. Pour reprendre une terminologie devenue classique et reprise par les auteurs déjà cités, l'albédo est ici un excellent indice de passage au deuxième stade du dessèchement du sol, quand le flux ascendant ne compense plus l'évaporation, mais il est beucoup moins utilisable quand le desséchement se poursuit. Il n'en n'est pas de même de l'écart des températures de surface entre les parcelles 1 et 2, dont l'accroissement suit fidèlement la chute du rapport E/E_r, et qui nous paraît donc ici un témoin d'autant mieux utilisable que la variation de $(\Delta\theta)_s$ avec E/E_r semble obéir à une loi linéaire *. On note que le 10 novembre, l'écart $(\Delta\theta)_s$ est resté négligeable, bien que l'albédo ait nettement varié pour la parcelle 1, passant de 0,28 à 0,33 ; la diminution de l'évaporation peut être ici uniquement imputée à l'augmentation d'albédo, apparemment donc plus sensible que la température de surface et l'évaporation au dessèchement d'une infime couche à la surface du sol.

En prévision du repérage des échanges entre le sol et l'atmosphère par télédétection, il semble donc que la mesure par radiométrie infra-rouge de la température de la surface du sol, soit plusieurs jours consécutifs comparables après une pluie, soit en se référant à une zone témoin irriguée, puisse fournir ici des résultats mieux utilisables que la mesure de l'albédo dont l'interprétation paraît délicate.

---

* Il est d'ailleurs possible de confirmer par l'analyse cette relation linéaire, à la variation d'albédo près : voir Itier et Perrier (1974).

Conclusion

Ce travail avait deux objectifs : d'une part, évaluer l'évaporation du sol nu dans des conditions de faible évaporation potentielle qui sont en général celles de la région, pendant la période pluvieuse, d'autre part, essayer de mettre en évidence une relation entre le flux évaporatoire et des paramètres caractéristiques de la surface évaporante : l'albédo et la température.

Les résultats suggèrent trois remarques :

1) Malgré l'existence d'une réhumectation nocturne de la surface du sol par un flux d'eau ascendant s'ajoutant à la condensation, l'évaporation du sol nu étudié tombe au-dessous de l'évaporation potentielle pourtant faible, peu de temps après une pluie et diminue ensuite rapidement. Ce phénomène est favorable au stockage de l'eau du sol et à sa migration en profondeur.

2) Pour ce sol, une faible diminution de l'évaporation E par rapport à l'évaporation potentielle E_p entraîne une augmentation très sensible de l'albédo qui fournit donc un très bon indice du premier stade du dessèchement du sol. Quand la chute de l'évaporation s'accentue, l'albédo par contre, augmente lentement et devient donc un témoin peu satisfaisant.

3) L'écart entre la température superficielle du sol en voie de dessèchement et celle d'une petite zone maintenue humide, augmente régulièrement quand le rapport E/E_p diminue, la relation étant ici linéaire. Ce paramètre, mesurable notamment par la télédétection, pourrait donc être utile à une évaluation du flux de vapeur d'eau.

Reçu pour publication en septembre 1979.

Summary

Evaporation from bare soil in semi-arid country during the cold season
Relations with albedo and soil surface temperature

Evaporation, albedo and surface temperature for bare soil and an irrigated plot have been measured in South Tunisia, after a rainfall.

An important reduction in the evaporation from the non-irrigated soil is noted, though the surface was wetted again during the night.

Albedo increases only during the first drying stage. On the other hand, differences between soil surface temperatures of the two plots (irrigated and non-irrigated) are in good agreement with the reduction of evaporation ; consequently, temperature measurements may be considered as better reference data.

Zusammenfassung

Die Verdunstung des nackten Bodens in halbtrockenem Gebiet
unter winterlichen Verhältnissen.
Beziehungen zwischen der Albedo und der Oberflächentemperatur des Bodens.

Die Verdunstung eines nackten Bodens in Süd Tunesien im November wird nach einem Regenfall gemessen sowie auch seine Albedo, seine Oberflächentemperatur und jene einer durch Bewässerung feucht erhaltene Parzelle.

Trotz einer nächtlichen Wiederbefeuchtung ergeben die Messungen einen schnellen Abfall der Verdunstung im Verhältnis zu dem Verdunstungspotential.

Die Albedo, anfangs sehr stark, entwickelt sich nachher langsam und unterrichtet schlecht über den letzten Stand der Bodenaustrocknung. Der Unterschied zwischen den Oberflächentemperaturen der beiden Parzellen folgt jedoch genau dem Abfall der Verdunstung und kann somit als ein guter Zeuge dieser Erscheinung betrachtet werden.

РЕЗЮМЕ

Испарение голой почвой в полу-засушливой зоне, в зимних условиях.
Соотношение с альбедо и температурой почвенной поверхности.

РИУ К., ЛАГУАРД Ж. П., ШАРТЬЕ Р.

Испарение голой почвой, альбедо этой почвы, температура ее поверхности и поверхностная температура почвы делянки поддерживавшейся в состоянии влажности, измерялись в Южном Тунисе в ноябре, после дождя.

Измерения эти показали быстрое ослабление испарения по отношению к испарению потенциальному, несмотря на существование ночного увлажнения.

Альбедо, сначала очень чувствительное, изменяется постепенно затем, и отдает поэтому плохо отчет о последних стадиях высыхания почвы.

Разница между температурами поверхности двух делянок, напротив, следует очень верно ослаблению испарения, и может, значит, рассматриваться как хороший показатель этого явления.

Références bibliographiques

BRUCE R. R., THOMAS A. W., HARPER L. A. and LEONARD R. A., 1977. Diurnal soil water regime in the tilled plow layer of a warm humide climate. *Soil Sci. Amer. J.*, **41,** 455-460.

COLOMBANI J., 1978. Utilisation de la sonde à neutrons pour la caractérisation d'un profil de sol du sud Tunisien simultanément à l'emploi de mesures tensiométriques et de traçages isotopiques et salins. Journées Scientifiques du Groupe Français d'Humidimètrie neutronique, 21-22 nov. 1978, Cadarache.

DAVIES J. A. and ALLEN C. D., 1973. Equilibrium, potential and actual evaporation from cropped surfaces in southern Ontario. *J. Appl. Meteorol.*, **12,** 649-657.

IDSO S. B., REGINATO R. J., JACKSON R. D., KIMBALL B. A. and NAKAYAMA F. S., 1974. The three stages of drying of a field soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **38,** 831-837.

IDSO S. B., JACKSON R. D., REGINATO R. J., KIMBALL B. A. and NAKAYAMA F. S., 1975. The dependence of bare soil albedo on soil water content. *J. Appl. Meteorol.*, **14,** 109-113.

ITIER B. et PERRIER A., 1974. Thermographie et détermination de l'évapotranspiration réelle des surfaces naturelles. Congrès de thermographie, Pays-Bas.

JACKSON R. D., IDSO S. B. and REGINATO R. J., 1976. Calculation of evaporation rates during the transition from energy. Limiting to soil. Limiting phases using albedo data. *Water Resour. Res.*, **12** (1), 23-26.

LAGOUARDE J. P., 1979. *Mesure de la température de surface du sol et son application en micrométéorologie.* Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Grenoble, à paraître.

PENMAN H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.* London Ser. A, **193,** 120-145.

PRIESTLEY C. H. B. and TAYLOR R. J., 1972. On the assessment of soil heat flux and evaporation using large parameters. *Mon. Weather Rev.*, **100,** 81-92.

RIOU Ch., 1975. *La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale.* Mémoire ORSTOM n° 80, 236 p.

Ann. agron., 1979, **30** (4), 363-385.

La volatilisation de l'ammoniac

I. — Influence de la nature du sol et des composés azotés

G. FAURIE et R. BARDIN

Laboratoire de Biologie des Sols Université Lyon-I
Bât. 741-43, *Bd du* 11 *novembre* 1918, 69622 *Villeurbanne Cedex*

Résumé

Le départ d'ammoniac dans l'atmosphère lors d'apport d'engrais azotés est la résultante des diverses voies du devenir de l'ammonium dans le sol : utilisation par les plantes ou les micro-organismes ou rétention par le complexe argilo-humique.

Cette volatilisation dépend du type de sol. Par leur action sur les équilibres suivants : $NH_4^+ + OH^- \rightleftarrows NH_3 + H_2O$; $NH_4^+ +$ colloïde $\rightleftarrows$ colloïde-NH_4^+, le pH et la capacité d'échange déterminent les teneurs en NH_3 libre.

Ainsi, l'augmentation de pH de 7 à 8 conduit à des pertes de 10 à 70 p. 100 de l'apport. La volatilisation réduite pour des C. E. C. supérieures à 20 m. e. 100 g^{-1} peut atteindre 20 à 75 p. 100 pour des C. E. C. inférieures à 10 m. e. 100 g^{-1}.

Cependant, ce départ d'azote est fonction des modalités de transferts de l'ammoniac dans le sol. La nature des composés azotés, leur concentration, leur présentation et leur mode d'application entrent donc en ligne de compte.

Parmi les produits étudiés, une volatilisation croissante est observée dans l'ordre suivant : NH_4NO_3, $(NH_4)_2SO_4$, $(NH_2)_2CO$, NH_4OH, l'urée et l'ammoniaque favorisant l'élévation de pH. L'effet de la dose est en relation avec la C. E. C. et le mélange du composé avec le sol, en augmentant sa distribution, réduit les pertes d'azote.

L'intensité des différents processus microbiens : ammonification, nitrification et immobilisation régissent également les risques de volatilisation. A ce niveau intervient la nature de la matière organique et de la source d'azote.

L'économie de l'azote nécessite la diminution de ces pertes. Les études menées au laboratoire permettent de cerner les facteurs qui induisent le dégagement. L'estimation du phénomène au champ est abordée par des méthodes isotopiques indirectes ou par l'étude du flux d'ammoniac dans l'atmosphère prenant en compte les facteurs de l'environnement.

Introduction

Qu'il provienne de la minéralisation de la matière organique ou de l'apport d'engrais, l'ammonium présent dans le sol à un moment donné a un devenir multiple : adsorption ou fixation sur le complexe argilo-humique, absorption par les plantes ou les micro-organismes pour réaliser leurs synthèses protéiques, transformation en nitrate par les germes nitrifiants, ou dégagement dans l'atmosphère sous certaines conditions.

Cette volatilisation de l'ammoniac est sous la dépendance de nombreux paramètres qui régissent les diverses voies du devenir de l'ammonium, en particulier, les facteurs édaphiques, la nature des produits azotés et les facteurs de l'environnement (Harmsen et Kolenbrander, 1965).

La volatilisation représenterait au niveau de la biosphère un départ d'azote ammoniacal du compartiment sol + eau de l'ordre de 165.10^6 t $N.an^{-1}$ (Robinson et Robbins, 1970). Même si ces chiffres sont surestimés, il n'en demeure pas moins qu'il s'agit d'un phénomène qui peut être aussi important que la dénitrification (Miller et Smith, 1976).

Le dégagement d'ammoniac s'est intensifié avec l'emploi des engrais azotés (fig. 1), les apports d'effluents d'élevage, les rejets industriels. Ainsi la teneur en NH_3 de l'air varie de 6 à 190 μg $N.m^{-3}$ dans certaines zones (Luebs *et al.*, 1974). La nécessité de réduire les pertes d'ammoniac prend donc toute sa valeur en raison du coût énergétique élevé des engrais azotés.

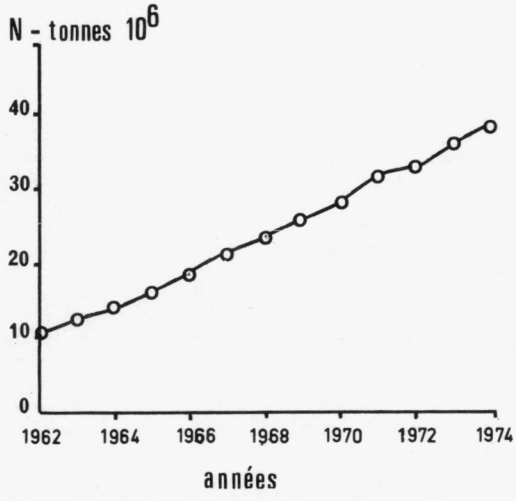


FIG. 1. — *Consommation mondiale d'engrais azotés* (1962-1974).
Worldwide consumption of nitrogen in fertilizers, 1962-1974 (*Pratt* et al., 1976).

Il est toutefois intéressant de noter que l'ammoniac de l'atmosphère peut être repris par le sol, les eaux et la végétation. Les expériences menées au laboratoire (Porter *et al.*, 1972) ou sur le terrain (Denmead *et al.*, 1976) prouvent que les végétaux récupèrent NH_3 au niveau foliaire. Hutchinson *et al.* (1972) estiment que les plantes peuvent absorber jusqu'à 20 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$ mais la part de cet élément dans la nutrition azotée du végétal mérite d'être précisée.

L'intérêt de l'étude des processus de volatilisation et du devenir de l'ammoniac est donc multiple et prend place dans une meilleure contribution à la connaissance du cycle de l'azote.

Dans ce premier article, nous présentons avec les méthodes d'étude de la volatilisation, les effets souvent conjugués de la nature du sol et des composés azotés.

Dans les sols de pH élevé ou rendus basiques par chaulage ou apport d'ammoniac, les pertes d'azote ammoniacal sont souvent importantes (Jackson et Chang,

1947 ; Martin et Chapman, 1951 ; Ernst et Massey, 1960 ; Fenn et Kissel, 1973 ; Faurie *et al.*, 1975 ; Matocha, 1976).

Cependant, cette volatilisation peut être réduite en sol alcalin de capacité d'échange élevée (Volk, 1959 ; Watson *et al.*, 1962 ; Gasser, 1964 ; Overrein et Moe, 1967 ; Loftis et Scarsbrook, 1969).

Quant aux composés azotés apportés au sol, engrais notamment, leur mode d'action dépend de leur nature, de leur dose, de leur conditionnement et de la technique d'application (Mc Dowell et Smith, 1958 ; Kresge et Satchell, 1960 ; Du Plessis et Kroontje, 1964 ; Mills *et al.*, 1974 ; Beauchamp *et al.*, 1978).

MÉTHODES D'ÉTUDE DE LA VOLATILISATION

I. — Méthodes de laboratoire

1. — *Principe et dispositifs expérimentaux*

Le même principe de mesure de la volatilisation apparaît dans l'ensemble des expériences. Au cours d'une incubation d'échantillons de sol enrichis en composé azoté, l'ammoniac dégagé dans l'atmosphère est piégé par de l'acide sulfurique ou borique dosé périodiquement.

Les incubations sont conduites dans des récipients de natures diverses : boîtes de Pétri suivant la méthode préconisée par Pochon et Tchan (1947), fioles d'erlenmeyer ou chambre d'incubation plus complexe (Kresge et Satchell, 1960 ; Overrein et Moe, 1967 ; Fenn et Kissel, 1973).

Les avantages et les inconvénients des méthodes d'incubation ayant été discutés par Harmsen et Van Schreven (1955), nous ne reviendrons pas sur ce problème ; par contre, nous présenterons les facteurs de variabilités rencontrés dans les diverses expériences car il est toujours nécessaire de les prendre en considération dans l'interprétation des résultats.

2. — *Paramètres pris en compte*

a) *Les sols.*

La gamme de sols étudiés est particulièrement vaste, puisque l'on rencontre des sols acides de pH inférieur à 5 (Blasco et Cornfield, 1966 ; Mahendrappa et Ogden, 1973), des sols neutres ou légèrement basiques ou rendus tels par chaulage (Ernst et Massey, 1960 ; Du Plessis et Kroontje, 1964 ; Fenn et Kissel, 1973) et des sols franchement alcalins (Jewitt, 1942 ; Wahhab *et al.*, 1957 ; Faurie et Bardin, 1971).

Si la plupart sont des sols de culture, notons cependant des sols d'écosystèmes prairiaux (Simpson, 1968 ; Cornforth et Chesney, 1971 ; Faurie *et al.*, 1975 ; Denmead *et al.*, 1976) ou forestiers (Volk, 1970 ; Watkins *et al.*, 1972 ; Morrison et Foster, 1977). Ceci sous-entend des textures, des teneurs en matière organique souvent très différentes, propriétés qui ne sont pas toujours précisées.

Des différences très nettes apparaissent également au niveau de la quantité de sol utilisée en incubation, puisqu'elle varie de 10 g à 1 kg et plus.

b) *Les composés azotés.*

Ce sont essentiellement les sels d'ammonium, sulfate et nitrate notamment, l'urée et l'ammoniac anhydre qui correspondent aux engrais les plus utilisés.

L'addition est effectuée soit :

— par application du composé solide ou liquide à la surface du sol ;

— par mélange avec le sol du composé solide ou préalablement mis en solution, méthode qui permet un ajustement à une humidité déterminée ;

— par apport en profondeur en enfouissant le produit sous une couche de sol.

Les quantités de composé azoté varient considérablement d'un auteur à l'autre de 100 à 1 200 kg $N.ha^{-1}$ et même plus.

c) *Les conditions expérimentales.*

En dehors des expériences concernant l'action de la teneur en eau sur la volatilisation, le facteur humidité est éminemment variable. Notons d'abord que l'humidité peut ou non être maintenue à l'humidité initiale. Les fluctuations sont rares dans les systèmes pourvus d'une circulation d'air humide convenable. Si une dessiccation intervient, elle peut être enregistrée ou contrôlée par un réajustement périodique de la teneur en eau. Ce phénomène est fréquent lorsque le capteur acide est situé dans l'enceinte d'incubation et ses variations doivent être prises en compte dans l'exploitation des résultats.

Les gammes de température se situent entre 4 et 32 °C avec une prédominance pour les valeurs entre 20 et 28 °C. Toutes les températures d'incubation seront données dans le texte en °C.

En ce qui concerne la durée d'incubation, les mesures de dégagements d'ammoniac peuvent porter sur 1 à 4 jours, fréquemment 8 à 15 jours ou beaucoup plus suivant l'objectif poursuivi.

Quelques essais de culture ont été réalisés *in vitro* afin de saisir l'influence de la végétation, mais il s'agit en général de germinations ou d'espèces résistantes aux conditions d'expérience (Mills *et al.*, 1974 ; Kresge et Satchell, 1960).

II. — Méthodes de terrain

Si les recherches de laboratoire rendent compte de la volatilisation en sol nu, rarement en présence d'un végétal, et de l'influence des facteurs intervenant sur le processus, les méthodes utilisées *in situ* tentent d'estimer les pertes d'azote en conditions naturelles, végétation spontanée ou champ cultivé.

1. — *Méthode indirecte*

Il s'agit de la méthode des bilans d'azote après fertilisation azotée. Elle consiste à considérer comme perte par volatilisation la quantité d'azote non retrouvée lorsqu'on

annule ou que l'on maîtrise les processus de lixiviation et de dénitrification. Cette démarche a été adoptée par différents auteurs lors d'un apport d'urée marquée en ^{15}N (Overrein, 1968 ; Simpson, 1968 ; Nommik, 1973 ; Ganry et Guiraud, 1978).

2. — *Méthode par capteur acide*

Le principe est le même que celui exposé dans les études *in vitro*. Les pièges à ammoniac sont placés en différents points de la parcelle étudiée et à des hauteurs variables suivant l'écosystème considéré : au niveau du sol en présence de gazon ras (Volk, 1959), entre 0 et 30 cm en prairie (Cornforth et Chesney, 1973), au niveau de diverses strates en forêt (Morrison et Foster, 1977).

Les pièges à ammoniac peuvent être formés de laine de verre imbibée d'acide sulfurique placée dans une enceinte disposée sur le sol (Volk, 1959), de disques de papier filtre préalablement traités à l'acide borique (Watson *et al.*, 1962 ; Morrison et Foster, 1977), de tubes contenant laine ou billes de verre avec de l'acide phosphorique (Denmead *et al.*, 1976 ; Beauchamp *et al.*, 1978). Des systèmes similaires à ceux utilisés *in vitro* ont été installés sur le terrain par Kissel *et al.* (1977) avec des pompes pouvant fonctionner 24 h. Cette méthode est généralement couplée à des études micro-météorologiques qui permettent l'enregistrement des facteurs de l'environnement.

III. — Expression des résultats

Des différences existent dans ce domaine tant en ce qui concerne le type de mesure utilisée que l'expression de la quantité d'azote volatilisé.

Par souci d'homogénéité et lorsque les éléments d'information le permettent, nous avons converti les valeurs d'azote en kg $N.ha^{-1}$ ou adopté la notion de ppm. Les résultats seront toujours exprimés en p. 100 de $N\text{-}NH_3$ volatilisé par rapport à la quantité d'azote ajouté.

INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL

I. — pH et $CaCO_3$

1. — *Résultats*

Dans des sols de pH 7 à 10,5, Jewitt (1942) note en présence de $(NH_4)_2SO_4$ une volatilisation de NH_3 de 0 à 87 p. 100. Avec le même composé azoté, Wahhab *et al.* (1957) montrent que le dégagement varie du simple ou double (13 à 25 p. 100) pour deux sols de pH 8,3 et 8,4. Gasser (1964) ne signale pas de différence notable dans la quantitée de NH_3 volatilisée dans deux sols dont les teneurs en $CaCO_3$ sont de 39 et 78 p. 100. Lors de recherches sur des sols de pH 7,8 à 8,3, Faurie et Bardin (1971) observent une volatilisation de 25 à 50 p. 100 pour des valeurs de $CaCO_3$ de 0,2 à 23 p. 100 (tabl. 1A).

TABLEAU 1

Influence du pH et de la teneur en $CaCO_3$ sur la volatilisation

Effect of pH and rate of $CaCO_3$ on ammonia volatilization

1A. — *Dégagement d'ammoniac dans différents sols de pH élevés enrichis en urée* (1 500 ppm N^-). *T* °C : 28°. *Ammonia-N loss from soils of high pH values at* 28 °C. *Urea-N applied at* 1 500 ppm (Faurie et Bardin, 1971).

pH	7,8	8,2	8,3
$CaCO_3$ p. 100	0,2	2,8	23,0
Argile p. 100	21,0	14,6	16,5
Carbone p. 100	3,4	2,3	1,1
$N\text{-}NH_3$ p. 100	25,1	39,8	50,3

1B. — *Influence de la modification de pH par apport de $CaCO_3$ sur la volatilisation dans un sol enrichi en urée* (112 kg $N.ha^{-1}$). *T* °C : 22°. *Ammonia-N loss as affected by soil pH* ($CaCO_3$ applied) (112 kg urea $N.ha^{-1}$) *top dressed on Dickson silt loam soil at* 22 °C (Ernst et Massey, 1960).

pH	5	5,5	6	6,5	7	7,5
$N\text{-}NH_3$ p. 100	8	12	20	25	40	50

De nombreux auteurs ont étudié, au laboratoire, l'effet simultané du carbonate et de l'élévation de pH consécutive à l'apport de doses croissantes de $CaCO_3$. On peut citer dans ce cadre les travaux de Ernst et Massey (1960) (tabl. 1B), de Du Plessis et Kroonjte (1964), de Mills *et al.* (1974). Ces derniers trouvent après addition de NH_4Cl une volatilisation inférieure à 17 p. 100 pour des sols de pH inférieur à 7,2 ,de 47 p. 100 si les sols ont un pH compris entre 7,5 et 8 et de 63 p. 100 pour des sols de pH supérieur à 8. Dans un sol faiblement alcalin enrichi en urée et additionné de $CaCO_3$ dans des proportions allant de 10 à 50 p. 100, nous avons observé une volatilisation qui passe de 7,2 à 13,2 p. 100. Pour Fenn et Kissel (1975), l'augmentation des pertes est surtout sensible entre 0 et 10 p. 100 de $CaCO_3$.

Afin d'apprécier le rôle joué par le pH, l'apport d'urée ou d'ammoniac est particulièrement bien adapté. En effet, l'injection d'ammoniac anhydre ou en solution ou sa libération au cours de l'hydrolyse de l'urée provoque une montée de pH qui peut atteindre 2 à 3 unités dans certains cas.

Ainsi en présence d'ammoniac McDowell et Smith (1958) constatent une évolution de pH de 6 à 8,8 et Overrein et Moe (1967) avec un apport d'urée enregistrent une augmentation de pH 6,5 à 9. Des résultats similaires ont d'ailleurs été décrits par Wagner et Smith (1958), Watkins *et al.* (1972), Lippold *et al.* (1975, fig. 2), Matocha (1976).

Bien que cette élévation de pH ne soit que transitoire, elle suffit à expliquer les pertes parfois considérables (20 à 50 p. 100) dans des sols peu tamponnés (Jackson et Chang, 1947 ; Martin et Chapman, 1951 ; Cornforth et Chesney, 1971 ; Matocha, 1976) alors qu'en présence de sulfate d'ammonium, ces pertes ne dépassent pas 1 p. 100 (Volk, 1961). Un tel résultat souligne l'importance de l'interaction sol-composé azoté.

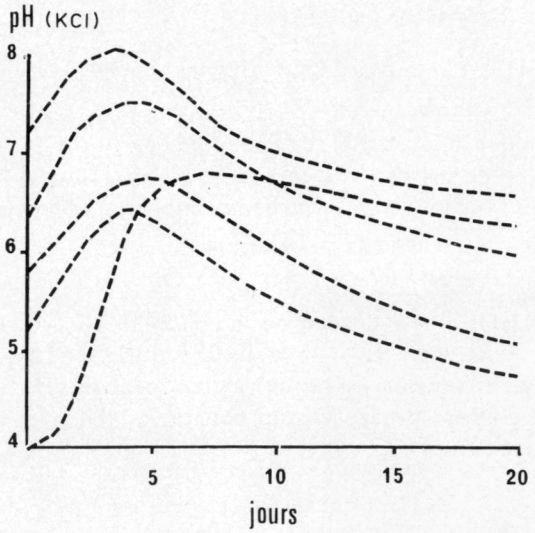


FIG. 2. — *Evolution du pH dans différents types de sol après apport d'urée* (100 kg $N.ha^{-1}$).
Soil pH evolution following urea application (100 kg $N.ha^{-1}$) *to various soil types* (*Lippold* et al., 1975).

Alors qu'accroître le pH est une opération aisée, le diminuer est délicat dans la pratique agricole. Signalons néanmoins deux expériences réalisées dans cette optique. Wahhab *et al.* (1957) ajoutent au sol du sulfate d'aluminium et observent une diminution concommitante de pH et de volatilisation ; Miyamoto *et al.* (1975) par apport d'acide sulfurique aux eaux d'irrigation traitées à l'ammoniaque réduisent de moitié le dégagement d'ammoniac.

2. — *Discussion*

De nombreux auteurs ont abordé à partir des réactions chimiques le rôle du pH et du $CaCO_3$ dans la volatilisation (Wahhab *et al.*, 1957 ; Ernst et Massey, 1960 ; Larsen et Gunary, 1962 ; Du Plessis et Kroonjte, 1964 ; Fenn et Kissel, 1973 ; Fenn, 1975 ; Avnimelech et Labb, 1977 ; Feagley et Hossner, 1978).

A l'aide de la formule suivante, il est possible d'expliquer certains mécanismes en fonction des variations des différents paramètres :

$$[NH_3] = \frac{K[NH_4^+]\,[OH^-]}{[H_2O]}.$$

Si le pH augmente, $[NH_3]$ va croître ainsi que les risques de volatilisation. Ce résultat est en accord avec les expériences de Larsen et Gunary (1962) qui constatent que le remplacement de $CaCO_3$ par $BaCO_3$ ou $MgCO_3$ augmente les dégagements, le pH du sol passant de 4,5 à l'origine à 7,1, 8,1 et 8,4 respectivement. Des résultats voisins sont obtenus par Fenn et Kissel (1973) et Feagley et Hossner (1978).

L'influence du $CaCO_3$ résulte de sa solubilité, donc de son action sur le pH mais également de sa réactivité avec les sels d'ammonium.

A ce sujet Fenn et Kissel (1973) proposent les équations que l'on peut énoncer ainsi :

$$(NH_4)_z\ Y + z/2\ CaCO_3 \rightleftarrows z/2(NH_4)_2CO_3 + Ca_{z/2}\ Y$$
$$(NH_4)_2CO_3 + H_2O \rightleftarrows 2\ NH_3 + CO_2 + 2\ H_2O\ .$$

Sur le plan chimique, il est possible de douter de l'existence du carbonate diammonique dans la gamme de pH des sols de 4 à 9 ; comme Feagley et Hossner (1978), on peut envisager les réactions avec le carbonate monoammonique :

$$(NH_4)_z\ Y + z\ CaCO_3 + 2\ H_2O \rightleftarrows z(NH_4)\ HCO_3 + Ca_{z/2}\ Y + z/2\ Ca(OH)_2$$
$$NH_4HCO_3 \rightleftarrows NH_3 + CO_2 + H_2O\ .$$

La quantité de NH_3 formé dépend de la solubilité du produit $Ca_{z/2}\ Y$. S'il est insoluble, les réactions se déplacent vers la droite dans le sens d'une perte accrue de NH_3. S'il est soluble, le dégagement est en relation avec le pH résultant (tabl. 2). A noter que le départ plus rapide de CO_2 par rapport à NH_3 peut entraîner une augmentation momentanée du pH.

TABLEAU 2

Influence du vecteur d'azote et de sa réactivité avec le carbonate sur la volatilisation d'ammoniac ($N\text{-}NH_4^+$: 550 kg $N.ha^{-1}$; T °C : 22°)

Ammonia-N loss from Houston Black clay soil at 22 °C *as influenced by the anion of several ammonium salts* ($N\text{-}NH_4^+$ applied at 550 kg $N.ha^{-1}$) (Fenn et Kissel, 1973)

Sel d'ammonium NH_4Y	pH du sol après apport	N-NH_3 p. 100	Solubilité de Ca_nY_x ($g.l^{-1}$)
NH_4F.....	8,91	68	0,001 6
$(NH_4)_2SO_4$	7,40	55	0,20
$(NH_4)_2HPO_4$.....	6,80	51	0,018
NH_4Cl.....	6,81	18	77,6
NH_4NO_3.....	6,65	18	133,6
NH_4I	6,58	16	214,4

La volatilisation de NH_3 a lieu par le jeu des équilibres ioniques puis par NH_3 dissous en équilibre avec sa vapeur.

Tout apport de $CaCO_3$, seul moyen efficace au niveau du champ pour corriger le pH, entraîne un surcroît de volatilisation, mais les quantités dégagées varient suivant le type de sol, son pH initial et le composé azoté.

Ces quelques résultats suffisent à montrer que la seule prise en compte des caractéristiques de pH ou de $CaCO_3$ ne permet pas de distinguer leurs rôles respectifs, ceux-ci pouvant de plus être masqués par d'autres propriétés du sol.

II. — Argile et matière organique

1. — *Résultats*

Dans des sols où la capacité d'échange (C.E.C.) est de 33 me.100 g^{-1}, Loftis et Scarsbrook (1969) ne décèlent pas de volatilisation pour des apports allant de 11 à 336 kg $N.ha^{-1}$ mais celle-ci est respectivement de 4 et 16 p. 100 pour des sols de C.E.C.

égales à 13 et 3,7 me.100 g^{-1}. Dans la plupart des cas, la volatilisation est inférieure ou égale à 10 p. 100 de l'apport dans des sols de C.E.C. supérieures à 20 me.100 g^{-1} mais peut dépasser 20 p. 100 et atteindre 75 p. 100 dans des sols sableux de C.E.C. inférieure à 10 me.100 g^{-1} (Martin et Chapman, 1951 ; Volk, 1959 ; Gasser, 1964 (fig. 3) ; Ryan et Keeney, 1975 ; Ganry et Guiraud, 1978).

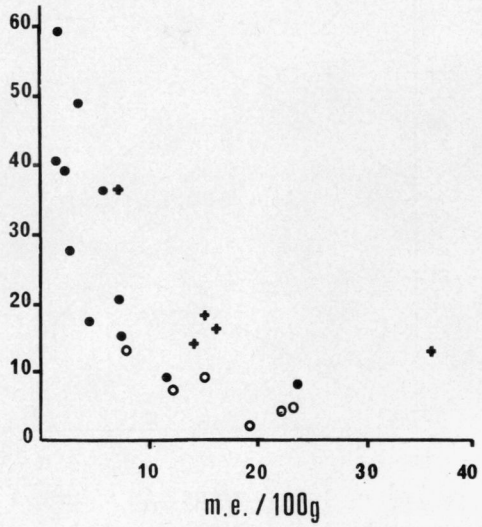


FIG. 3. — *Influence de la capacité d'échange sur la volatilisation* (urée 100 kg N.ha^{-1}).
Ammonia-N loss as influenced by base-exchange capacity (urea : 100 kg N.ha^{-1}) (*Gasser*, 1964).

Nos études en sol calcaire sableux nous ont permis de quantifier l'effet d'un apport de montmorillonite — H^+ sur les pertes par volatilisation. Dans le sol enrichi en urée, le dégagement d'ammoniac qui atteint 67 p. 100 dans le témoin n'est que de 37 et 13 p. 100 dans le sol additionné de 10 à 20 p. 100 d'argile. Les relations observées entre taux d'argile ajouté, volatilisation, adsorption et fixation d'ammonium sont particulièrement nettes (fig. 4). Dans ces expériences, la rétention de NH_4^+ est de 0,2 me.N pour chaque pourcent d'argile, répartie entre NH_4^+ adsorbé et fixé, ce dernier étant obtenu après extraction par le mélange HF-HCl (Nelson et Bremner, 1966).

Fenn et Kissel (1976) réalisent une étude du même type mais effectuent des mélanges de sable et argile calcaire créant ainsi des systèmes de C.E.C. comprises entre 0 et 59 me.100 g^{-1}. En présence de $(NH_4)_2SO_4$, ils constatent que les pertes passent de 80 à 45 p. 100 et qu'à partir d'une C.E.C. proche de 20 me.100 g^{-1}, elles restent constantes.

Cependant on peut citer les travaux d'Hanawalt (1969) qui, après apport de billes de verre à un sol argileux observe une augmentation nette de la rétention de NH_3 par le sol. Ce chercheur attribue ce résultat à une diffusion plus large de l'ammoniac dans le sol, ce qui rappelle le rôle capital joué par les aggrégats dans ces phénomènes (Fenn et Kissel, 1976).

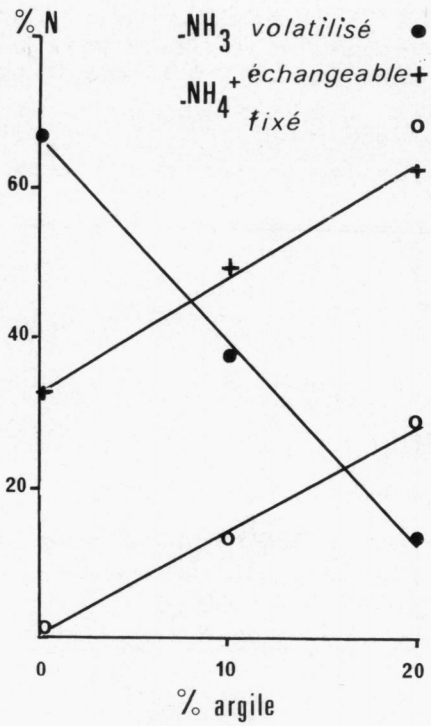


FIG. 4. — *Influence d'un apport d'argile sur la quantité d'azote ammoniacal volatilisé, adsorbé et fixé* (*urée* : 1 000 ppm N).

Effect of added clay on NH_3 *loss, adsorption and fixation of* NH_4^+ (*urea-N* : 1 000 ppm) (*Faurie* et al., 1975).

Dans des sols sableux de faible C.E.C., les résidus de récolte enfouis permettent de doubler par rapport au sol initial, la quantité d'ammonium retenu (Coffee et Bartholomew, 1964). La destruction par la chaleur de la matière organique réduit, selon les cas, de 12 à 50 p. 100 la capacité d'adsorption de NH_3 (Hanawalt, 1969).

Les expériences de Pochon *et al.* (1947) soulignent l'effet de la richesse en humus des sols sableux ou de l'apport de glucides sur la réduction de la volatilisation.

En présence d'urée, de nombreux auteurs notent une stimulation de l'activité uréasique lors d'apport de résidus de maïs (Moe, 1967), de glucose (Zantua et Bremner, 1976), de cendres de plantes (Raison et Mc Garity, 1978) et plus généralement dans les horizons de surfaces riches en matière organique. Une corrélation significative semble exister en effet, entre activité uréasique et matière organique (Dalal, 1975), ce qui peut s'expliquer en partie par le rôle protecteur de la matière organique vis-à-vis de l'enzyme. On sait que l'activité uréasique résulte non seulement de l'uréase libérée par les micro-organismes à un moment donné mais aussi de l'uréase persistant dans le sol.

2. — *Discussion*

La relation existant entre volatilisation et teneur en argile et matière organique a pour origine principale la rétention de l'ammonium à leur niveau.

Pour Fenn et Kissel (1976) et Van Veen (1977), l'existence de l'équilibre dynami-

que entre ions libres et adsorbés permet d'estimer l'importance de la volatilisation. Toutefois, la seule prise en compte du facteur C.E.C. n'est pas toujours satisfaisante.

L'argile joue non seulement par ses capacités d'adsorption de l'ammonium (Brown et Bartholomew, 1963 ; Shimpi et Savant, 1975) mais également par ses possibilités de fixation. A ce propos, le type d'argile est à prendre en considération. Ainsi, la montmorillonite dont la capacité d'adsorption est élevée voit son pouvoir fixateur accru dans certaines limites lorsque l'ion saturant est le calcium (Allison *et al.*, 1951 ; Faurie *et al.*, 1975 ; Raju et Mukhopadhyay, 1977). Cet ammonium difficilement accessible pour les plantes et les microorganismes (Axley et Legg, 1960) est souvent considéré comme une perte dans les bilans azotés (Mc Dowell et Smith, 1958 ; Nelson et Hauck, 1965). Cette voie de recherche qui a fait l'objet de synthèses bibliographiques (Mortland et Wolcott, 1965 ; Nommik, 1965) s'est élargie avec l'emploi de l'ammoniac anhydre (Parr et Papendick, 1966) comme engrais.

Si les informations sont relativement nombreuses en ce qui concerne l'effet de l'argile, les résultats qui traitent de la rétention de NH_3 au niveau de la matière organique sont plus restreints et les mécanismes demeurent mal connus (Parr, 1969). L'ammoniac peut réagir avec des groupements carboxyl, phénol, aldéhyde, cétone, alcool..., ce qui laisse présager de la variété des possibilités. Une partie importante de cet azote ne se trouve pas sous forme échangeable et sa disponibilité est de ce fait réduite.

Il faut également garder à l'esprit que l'argile et la matière organique jouent aussi un rôle prépondérant dans la structure du sol, si importante dans les processus de diffusion. Ainsi l'effet bénéfique d'un accroissement de la C.E.C. est limité par les phénomènes de transferts de NH_3 dans le sol.

Les contradictions relatives à l'effet de la matière organique sur la volatilisation trouvent essentiellement leurs origines dans la diversité des types de composés organiques. L'ambiguité des interprétations repose sur le fait que la matière organique est à la fois phase adsorbante et source de composés carbonés et azotés.

La réduction de la volatilisation en présence de matière organique est interprétée par une rétention accrue de l'ammonium mais aussi par une réorganisation accélérée du fait du développement de la microflore hétérotrophe rendue sensible à la valeur énergétique des composés carbonés et non par un freinage de l'attaque des protéines.

L'augmentation du dégagement d'ammoniac a surtout été enregistrée lors d'apport d'urée et peut se comprendre par l'existence d'une forte activité uréasique dans les sols riches en matière organique et par une stimulation de la minéralisation dans ces conditions.

INFLUENCE DES COMPOSÉS AZOTÉS

I. — Nature des composés

1. — *Sel ammoniacal*

Des volatilisations décroissantes sont constatées en fonction des sels suivants : NH_4F, $(NH_4)_2SO_4$, $(NH_4)_2\ HPO_4$, $NH_4H_2PO_4$, NH_4Cl, NH_4NO_3, NH_4I (Larsen et Gunary, 1962 ; Fenn et Kissel, 1973, tabl. 2).

Fenn (1975) complète cette étude par l'analyse de mélange $NH_4H_2PO_4$-$(NH_4)_2SO_4$ et observe que, pour un rapport 30/70, les pertes d'ammoniac sont réduites et égales à celles constatées après apport de NH_4NO_3 ou $NH_4H_2PO_4$ seuls. La faible volatilisation en présence de NH_4NO_3 est enregistrée par tous les auteurs : Kresge et Satchell, 1960 (tabl. 3) ; Meyer *et al.*, 1961 ; Volk, 1961 ; Fenn et Escarzaga, 1976.

TABLEAU 3

Influence de la nature et de la dose de composés azotés sur la volatilisation
Influence on ammonia volatilization of rate and form of nitrogen applied to Hagerstown silt loam
(Kresge et Satchell, 1960)

	N-NH_3 p. 100			
	NH_4NO_3	$(NH_4)_2SO_4$	$CaCN_2$	$(NH_2)_2CO$
N kg.ha^{-1}				
50	0	1,0	5,6	5,0
150	0,9	1,6	14,7	28,9
300	1,1	2,8	20,7	83,8

Les pertes à partir des sels d'ammonium sont surtout importantes dans les premières heures de l'application et diminuent très nettement au cours du temps (Fenn et Kissel, 1973).

Les inhibiteurs de nitrification comme le « N-serve » (2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine) utilisés pour réduire les pertes de nitrate par lixiviation semblent favoriser indirectement la volatilisation. Cornforth et Chesney (1971) notent qu'en présence de 2-amino-4 chloro-6 methyl-pyrimidine, la nitrification est ralentie et les pertes par dégagement de NH_3 sont plus intenses qu'avec le composé seul $(NH_4)_2SO_4$. Différentes hypothèses ont été retenues : d'une part, l'oxydation de NH_4^+ s'opère lentement et l'ammoniac resté libre se volatilise ; d'autre part, l'apport d'inhibiteur diminue l'acidité normalement décelée en présence de sulfate d'ammonium (Ehr *et al.*, 1971 ; Faurie, 1977).

2. — *Produit organique*

En expérience d'incubation, le maximum de volatilisation se situe dans les quatre premiers jours pour des composés comme l'urée, la poudre de sang ou de soja (Pochon *et al.*, 1947). Comparant urée et asparagine, nous remarquons que l'urée est transformée plus rapidement (fig. 5) et le bilan de volatilisation sur 8 jours est de 67 p. 100 avec l'urée et 44 p. 100 avec l'asparagine.

Les pertes en présence d'urée sont toujours plus importantes qu'avec les autres composés, ce qui peut expliquer le grand nombre de recherches à ce sujet. Meyer *et al.* (1961) donnent l'ordre suivant : $(NH_2)_2$ CO : 17 p. 100, $(NH_4)_2SO_4$: 10 p. 100, NH_4NO_3 : 5 p. 100. Dans des sols de pH 4,4 à 6,7, les pertes en présence d'urée passent de 17 à 59 p. 100 alors qu'elles sont inférieures à 1 p. 100 avec le sulfate d'ammonium (Volk, 1961 ; Matocha, 1976). Seule une application d'ammoniaque permet de dépasser les valeurs observées avec l'urée (Martin et Chapman, 1951).

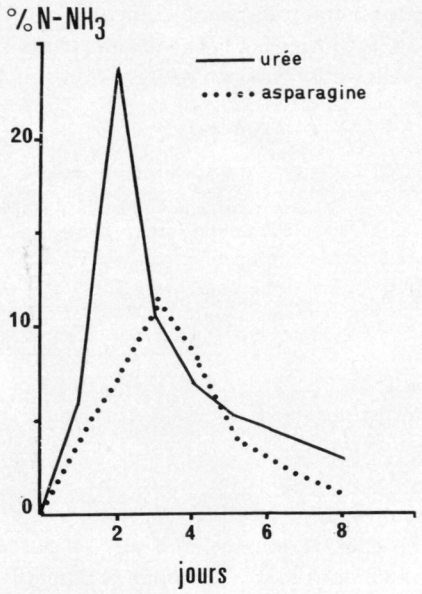


FIG. 5. — *Cinétique du dégagement d'ammoniac en fonction de la source d'azote* (*N* : 1 000 ppm).
Evolution of ammonia-N loss as affected by various N-sources (*N* : 1 000 ppm) (*Faurie*).

Les engrais simples ne représentent plus que 20 p. 100 de la consommation, du moins en France, aussi les renseignements sur les mélanges de composés ont le plus grand intérêt, ce qui est particulièrement vrai pour l'urée.

Les mélanges urée-nitrate d'ammonium ont été étudiés par Volk (1959), puis par Kresge et Satchell (1960) qui signalent que les pertes passent de 74 p. 100 à 18 p. 100 lorsque dans les mélanges le rapport $NH_4NO_3/(NH_2)_2CO$ varie de 0/100 à 70/30.

L'urée est quelquefois associée aux phosphates. Dans la majorité des exemples rencontrés, on constate une réduction de la volatilisation. Cette diminution qui peut être considérable avec une addition d'acide phosphorique qui provoque l'inhibition de l'activité uréasique et une baisse de pH (Bremner et Douglas, 1971) reste limitée voire nulle lorsqu'on se trouve en présence de sels (Watson *et al.*, 1962 ; Terman et Hunt, 1963 ; Misra et Singh, 1970 ; Mahendrappa et Ogden, 1973 ; Nommik, 1973). Les données restent difficiles à interpréter et sont liées à l'activité microbienne uréasique ou nitrifiante. Ainsi, en présence de phosphate monopotassique, Faurie et Bardin (1971) observent une activation de l'ammonification qui provoque un dégagement supplémentaire d'ammoniac en début d'expérimentation, mais au bout de 16 jours, les pertes se révèlent moins importantes au plan global.

L'urée étant très soluble et très facilement hydrolysable, des recherches ont abouti à des produits de synthèse tel que l'urée-formol (Loftis et Scarsbrook, 1969) qui libèrent plus lentement l'azote ammoniacal. Une autre approche a consisté à enrober l'urée de substances telles que les paraffines, résines, gommes, soufre ou à apporter des inhibiteurs temporaires de l'activité uréasique (Nelson et Hauck, 1965).

D'un coût moins élevé, le soufre qui peut jouer par ailleurs, un rôle d'élément nutritif secondaire est employé industriellement. L'étude de l'urée enrobée de soufre

a fait l'objet de publications qui soulignent l'efficacité du procédé pour freiner la volatilisation (Matocha, 1976 ; Prasad, 1976, tabl. 4). Dans ces conditions les pertes deviennent inférieures à celles observées en présence de sulfate d'ammonium.

TABLEAU 4

Effet du taux de dissolution des composés azotés sur la volatilisation. N^- : 1 000 ppm, *T* °C : 32°

Ammonia-N loss from N-sources of various dissolution rate added to Princestown clay at 32 °C. N^- : 1 000 ppm (Prasad, 1976)

	$(NH_4)_2SO_4$	$(NH_2)_2CO$			
		seule	avec enrobage de soufre		
Taux de dissolution ...	—	—	44,7	28,5	8,8
N-NH_3 p. 100.....	16,7	20,6	7,1	5,4	0,9

L'addition au laboratoire de produit bactériostatique comme le toluène donne des résultats variables. En effet, le toluène agit sur les micro-organismes et n'a pas d'action sur l'uréase présente dans le sol (Bremner et Douglas, 1977), ce qui contribue d'ailleurs à mieux expliquer les corrélations entre C.E.C. et cette activité (Dalal, 1975). Dans certains cas, le toluène peut même promouvoir l'activité uréasique du fait de la libération de l'enzyme lors de la lyse des cellules (Zantua et Bremner, 1976).

La stérilisation du sol par la chaleur détruit l'enzyme (Acquaye et Cunningham, 1965) et la réduction de la volatilisation dans les sols enrichis en urée après brulis peut se comprendre par ce phénomène (Volk, 1970).

Des inhibiteurs spécifiques ont été recherchés par Bremner et Douglas (1971) qui retiennent les composés phénoliques et les hydroquinones pouvant réduire de 70 p. 100 l'activité uréasique. En présence d'hydroxamates qui ne sont pas des inhibiteurs compétitifs de cette activité, Pugh et Waid (1969) enregistrent des diminutions de pertes en NH_3 à partir d'urée. Le chloromenamate éprouvé par Moe (1967) retarde l'hydrolyse de l'urée, mais son effet n'est pas très significatif sur la volatilisation.

Dans le cas des composés organiques comme les boues résiduaires ou les fumiers, 10 à 50 p. 100 de l'azote total se trouve en fait sous forme ammoniacale. Aussi la nature physique ou chimique du produit intervient directement sur les possibilités de volatilisation. Au laboratoire, Ryan et Keeney (1975) enregistrent des dégagements d'ammoniac de 11 à 60 p. 100 de l'azote appliqué. Les mesures de volatilisation réalisées sur le terrain atteignent également 60 p. 100 (Lauer *et al.*, 1976 ; Beauchamp *et al.*, 1978). Au bout de 3 à 5 jours après application de boues, Beauchamp *et al.* (1978) notent une volatilisation de 50 p. 100 de l'azote ammoniacal. Suite à l'apport de fumier, Lauer et *al.* (1976) constatent une perte de 61 p. 100 en 5 jours, qui s'élève à 99 p. 100 au bout de 25 jours.

II. — Quantité de composé

Dans leurs expériences Kresge et Satchell (1960) (tabl. 3) observent avec des doses croissantes, une augmentation de la volatilisation. La variation est faible en pré-

sence de NH_4NO_3, ce que notent également Fenn et Kissel (1974) pour des quantités comprises entre 30 et 550 kg $N.ha^{-1}$. En ce qui concerne l'urée, l'accroissement du pourcentage de NH_3 dégagé est net mais parfois moins élevé : 0 à 12 p. 100 pour des apports de 0 à 400 kg $N.ha^{-1}$ (Volk, 1970).

Martin et Chapman (1951) signalent que si les quantités d'ammoniac dégagé augmentent avec la quantité de $(NH_4)_2SO_4$ apporté, le pourcentage reste constant. Des relations linéaires sont d'ailleurs enregistrées par Chao et Kroontje (fig. 6).

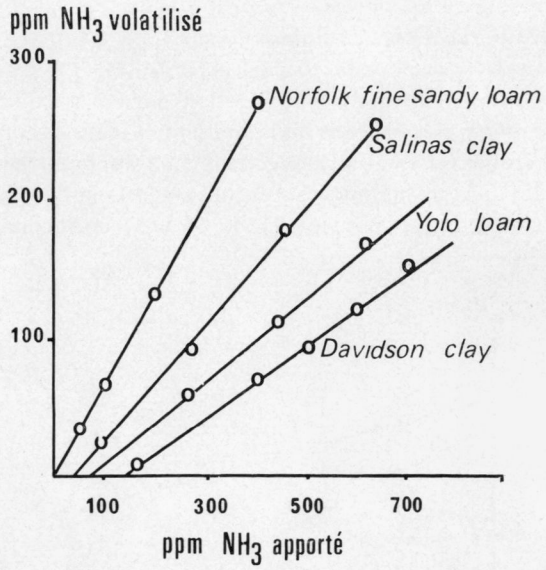


FIG. 6. — *Influence du type de sol et de la quantité d'ammoniac apporté sur la volatilisation.*
Ammonia volatilization from different soils in relation to amounts of NH_3 applied (Chao et Kroontje, 1964).

Ces différents résultats indiquent que des facteurs plus importants que l'apport, comme la nature du composé, le pH et la C.E.C. entrent en ligne de compte. Ainsi dans un sol chaulé, Mills *et al.* (1974) signalent qu'entre pH 5,5 et 7 le dégagement est indépendant de la quantité ajoutée, mais, à pH 8,5, l'ammoniac volatilisé est de 50 p. 100 pour 200 kg $N.ha^{-1}$ et 88 p. 100 pour 1 300 kg $N.ha^{-1}$.

III. — Mode d'application du composé

La plupart des études technologiques sur les pertes en ammoniac portent sur la comparaison des épandages en surface ou des enfouissements. Le fait de recouvrir l'engrais ou le fumier de quelques centimètres de sol peut réduire les pertes par volatilisation de 10 à 40 p. 100 (Jackson et Chang, 1947 ; Wahhab *et al.*, 1957 ; Ernst et Massey, 1960 ; Ganry et Guiraud, 1978). Overrein et Moe (1967) plaçant des cristaux d'urée entre 0 et 2,5 cm de profondeur constatent que le dégagement de NH_3 tombe de 60 à 20 p. 100.

L'influence sur la volatilisation de la taille des granules a fait l'objet d'études comparatives dans le cas de l'urée. Pour des diamètres allant de 1 à 50 mm le dégagement passe de 38 à 33 p. 100 (Watkins *et al.*, 1972), ce qui correspond à des variations limitées (Volk, 1959 ; Gasser, 1964 ; Nommik, 1973).

Dans le cas de l'ammoniac anhydre, Mc Dowell et Smith (1958), lors d'études dans des sols de textures diverses, notent que, pour des doses identiques à l'hectare, les pertes sont plus faibles lorsque les zones d'application sont plus rapprochées.

En ce qui concerne la profondeur d'injection, Kämpfe et Ansorge (1973) estiment que 15 cm est une valeur compatible avec la pratique agricole et correcte pour réduire la volatilisation dans le cas d'apport d'ammoniac.

L'augmentation de la surface de contact entre le sol et le composé azoté du fait de l'accroissement de la profondeur d'application permet d'expliquer une meilleure diffusion et une rétention plus efficace de l'ammonium, cependant tributaires du type de sol (fig. 7). Ce résultat est en accord avec tous ceux qui montrent que les pertes sont d'autant plus faibles que le mélange sol-fertilisant est plus homogène (Terman et Hunt, 1951 ; Meyer *et al.*, 1961 ; Gasser, 1964 ; Macrae et Ancajas, 1970).

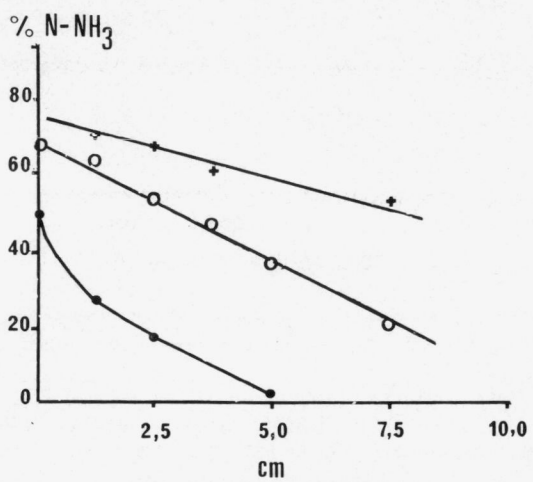


FIG. 7. — *Influence du type de sol et de la profondeur d'application de l'engrais sur la volatilisation* ($N\text{-}NH_4^+$: 550 kg.ha^{-1}).

Influence of soil type and fertilizer placement depth on NH_3*-N losses* (NH_4^+*-N* : 550 kg.ha^{-1}) *(Fenn et Kissel, 1976).*

IV. — Discussion

La nature du composé azoté, la quantité utilisée et la technique d'apport sont certes les facteurs à ne pas négliger dans l'importance du processus de volatilisation.

Dans les sols calcaires, l'addition de sels d'ammonium se manifeste par des différences de volatilisation dues à la réaction avec le carbonate (Fenn et Kissel, 1973). En ce qui concerne l'urée ou l'ammoniaque, l'élévation de pH consécutive à leur apport favorise le dégagement de NH_3. Le nitrate d'ammonium, engrais le plus

répandu, provoque peu de pertes d'ammoniac, mais les risques de lixiviation sont à craindre. Dans le même ordre d'idée, les inhibiteurs de nitrification qui ont pour but de réduire les pertes de nitrate contribuent parfois à induire une volatilisation, du fait de l'utilisation différée de l'ammonium.

Les différences de quantités de NH_3 dégagé, relevées dans les expériences de laboratoire entre substrats azotés sont tributaires du temps d'étude du phénomène. Prasad (1976) note que des travaux menés sur 21 jours peuvent à la limite donner des résultats inverses de ceux recueillis au bout de 8 jours.

L'augmentation des doses de composés azotés entraîne une plus forte volatilisation surtout en présence d'urée. S'il s'agit d'une réaction de premier ordre, à pH élevé, les pertes peuvent être proportionnelles aux ajouts à partir du moment où le seuil d'adsorption est dépassé.

La présentation de l'engrais (granulation ou enrobage des produits) conditionne sa dissolution : l'urée enrobée de soufre libère progressivement l'azote dans le milieu, les pertes par volatilisation sont réduites et les quantités d'azote retrouvées dans les plantes sont supérieures (Volk, 1961 ; Terman et Hunt, 1963). Les études concernant les inhibiteurs de l'activité uréasique demeurent à l'état expérimental et leur effet sur le dégagement d'ammoniac n'est pas toujours bénéfique.

Le mode d'épandage détermine la surface de contact du composé avec le sol, son adsorption et ses possibilités de diffusion. Les effluents d'élevage, les boues résiduaires suivant leur conditionnement sont généralement appliquées en surface et sont la cause d'une volatilisation intense. D'ailleurs Miller et Smith (1976) notent que le départ de NH_3 est de 5 p. 100 à partir d'engrais azotés et atteint 30 p. 100 de l'apport sous forme de fumiers.

A ce propos, les résultats de laboratoire obtenus avec de faibles quantités de sol, lors d'apports en surface ou en mélange avec le sol, sont souvent identiques du fait de l'augmentation de la surface de contact sol-atmosphère.

Conclusion

L'ampleur du processus de volatilisation de l'ammoniac est sous l'étroite dépendance de la nature du sol et des composés azotés qu'on lui adjoint.

Les réactions d'équilibre suivantes laissent prévoir les pertes d'ammoniac et ont permis la modélisation des relations entre volatilisation et pH d'une part et C.E.C. d'autre part :

$$NH_4^+ + OH^- \rightleftarrows NH_3 + H_2O$$

$$NH_4^+ + \text{colloïde} \rightleftarrows \text{colloïde-}NH_4^+.$$

Si l'accroissement des pertes est de 12 p. 100 entre pH 6 et 7, il peut atteindre 67 p. 100 entre pH 7 et 8. Par son action sur le pH, le rôle du $CaCO_3$ est d'importance, et des sols de teneurs identiques en $CaCO_3$ peuvent présenter des réactions différentes selon la granulométrie du carbonate et l'humidité qui régit sa solubilité et celle du composé azoté.

Tous les résultats confirment qu'à partir d'une C.E.C. voisine de 20 m.e. 100 g^{-1},

la volatilisation est faible, mais les pertes peuvent dépasser 20 p. 100 de l'apport pour des C.E.C. inférieures à 10 m.e. 100 g^{-1}. Bien que de nombreux sols agricoles aient des C.E.C. comprises entre 10 et 15 m.e. 100 g^{-1}, il ne faut pas omettre les problèmes qui se posent avec acuité en sol sableux : certains sols tropicaux notamment.

L'économie de l'azote dans ces agrosystèmes implique la baisse du rapport pertes d'azote/azote des parties aériennes ; aussi la nature des composés azotés et leur mode d'application devient un facteur prédominant.

L'influence des composés azotés se manifeste à différents niveaux du fait de leur impact sur les propriétés du sol et sur l'activité microbienne.

Certains comme l'urée ou l'ammoniac anhydre provoquent une augmentation de pH de deux à trois unités et favorisent le dégagement. Les sels d'ammonium réagissent avec le carbonate et la nature de l'anion détermine les possibilités de pertes.

Parmi les composés les plus étudiés, la volatilisation est d'autant plus importante suivant que l'on est en présence de nitrate d'ammonium, de sulfate d'ammonium, d'urée ou d'ammoniaque.

Lorsque la concentration en NH_4^+ augmente, $[NH_3]$ augmente également, mais à ce niveau interviennent outre les cinétiques de réactions d'adsorption, les modalités de transfert de l'ammoniac ainsi que son utilisation par la microflore.

La dissolution et la diffusion dans le sol dépendent de la présentation de l'engrais et de la technique d'application. Notons le rôle des enrobages de soufre dans la réduction de la volatilisation et l'enfouissement qui est recommandé pour freiner le dégagement.

La seule prise en compte des paramètres pH et C.E.C. est donc insuffisante pour expliquer tous les mécanismes.

La fixation de l'ammonium par les colloïdes argileux ou humiques réduit la volatilisation mais entraîne un autre type de pertes du fait de la moindre accessibilité de cette forme d'azote.

La nature de la matière organique, qu'il s'agisse de celle du sol ou d'un apport est déterminante. Son action, comme nous l'avons vu, apparaît aussi bien dans les phénomènes de rétention de l'ammonium que dans les processus microbiens et est en relation avec la source d'azote ajouté. Les résultats de volatilisation diffèrent donc suivant l'intensité de l'immobilisation, de l'ammonification et de la nitrification.

L'utilisation différée de l'ammonium lors d'ajout d'inhibiteur de nitrification contribue souvent à augmenter le dégagement d'ammoniac. Les éléments susceptibles de modifier l'activité uréasique, phosphore par exemple, ne s'avèrent pas toujours efficaces pour réduire les pertes par volatilisation.

Les recherches de laboratoire permettent de cerner le rôle spécifique de chacun des facteurs impliqués dans le processus de volatilisation. Cependant, les résultats obtenus avec des échantillons limités, lors d'apports souvent massifs, rendent difficiles l'extrapolation au champ. Les pertes globales estimées avec précision par les méthodes isotopiques atteignent 40 p. 100 voire 50 p. 100, mais la connaissance de leur nature nécessite des études complémentaires. Intégrant les facteurs de l'environnement, les méthodes d'évaluation du dégagement d'ammoniac sur le terrain en présence d'un couvert végétal sont en voie de développement.

L'influence des paramètres climatiques et de la végétation sur l'intensité du départ d'ammoniac dans l'atmosphère sera abordée dans une seconde partie.

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à MM. C. Juste et J. C. Rémy (respectivement, Stations d'agronomie INRA de Bordeaux et de Laon) qui nous ont fait bénéficier de leurs conseils lors de la rédaction de cet article.

Summary

Volatilization of ammonia

I. *Influence of the nature of soil and nitrogen compounds*

Gaseous loss of ammonia from applied nitrogen fertilizers is the resultante of the various ways of distribution of ammonia in soil, i.e., uptake by plants or microorganisms, retention by the clay-humus complex.

Such volatilization depends on the soil type. Owing to the following states of equilibrium : $NH_4^+ + OH^- \rightleftarrows NH_3 + H_2O$; $NH_4^+ +$ colloid $\rightleftarrows$ colloid-NH_4^+ the pH and cation-exchange capacity determine the free NH_3 content.

Thus, increasing pH from 7 to 8 induces a loss amounting from 10 to 70 p. 100 of the fertilizer applied. Volatilization is negligible when the C. E. C. is greater than 20 m. e. 100 g^{-1} but may rise from 20 to 75 p. 100 when the C. E. C. is less than 10 m. e. 100 g^{-1}.

However, this nitrogen loss depends on the ammonia transfer conditions in the soil, and hence, the type of nitrogen compounds, their concentration, their formulation and method of application may be considered.

For the compounds investigated, increasing volatilization is observed in the following : NH_4NO_3, $(NH_4)_2SO_4$, $(NH_2)_2CO$, NH_4OH ; urea and ammonium hydroxide increase the pH. The effect of application rate is related with the C. E. C. and mixing the compound with soil increase its dispersion and reduces volatilization.

Intensity of the various microbial processes, i.e., ammonification, nitrification, immobilization also control the nitrogen loss. At this level, the effect of nature of the organic matter and applied material is important.

Nitrogen economics requires practices for minimizing the losses. Laboratory investigations were conducted to determine the major factors responsibles of volatilization. Appraising this phenomenon in the field is approached using isotopic methods or investigating the flux of ammonia in the atmosphere duly considering the environmental factors.

Zusammenfassung

NH_3-Verflüchtigungverluste

I. *Einfluss der Bodenbeschaffenheit und der Stickstoffverbindungen*

Die Ammoniakverluste bei Stickstoffdüngung ist die Resultante der verschiedene Wege der Ammoniumverteilung im Boden : Ausnützung bei Pflanzen oder Mikroorganismen oder Sorption bei Humus-Ton Komplex.

Die Verflüchtigung hängt vom Bodenart ab. Durch ihre Wirkung auf die folgenden Gleichgewichte : $NH_4^+ + OH^- \rightleftarrows NH_3 + H_2O$, $NH_4^+ +$ Kolloïd $\rightleftarrows$ Kolloïd-NH_4^+ bestimmen der pH-Wert und die Austauschkapazität die NH_3-Gehalte.

So führt die pH-Erhöhung von 7 bis 8 zu Verluste von 10 bis 70 Prozent der eingesetzten N-Menge. Die geringere Verluste mit Austauschkapazität oberhalb 20 m. e. 100 g^{-1} können mit Austauschkapazität unterhalb 10 m. e. 100 g^{-1}, 20 bis 75 Prozent erreichen.

Diese Stickstoffverflüchtigung hängt jedoch von der Ammoniakausbreitung im Boden ab. Der Typ der Stickstoffverbindungen, ihre Konzentration, ihr Form und die Applikationmodalitäten sind deshalb von grosser praktischer Bedeutung.

Unter den versuchten Produkten werden steigende NH_3-Verluste in folgender Ordnung festgestellt : NH_4NO_3, $(NH_4)_2SO_4$, $(NH_2)_2CO$, NH_4OH ; Harnstoff und Ammoniak-Wasser förderen die pH-Erhöhung. Die Wirkung der Konzentration hängt von der Austauschkapazität ab, und das Gemisch der Verbindung mit dem Boden verringert die Stickstoffverluste bei einer besseren Ausbreitung.

Die Intensität der verschiedenen mikrobiellen Prozesse : Ammonifikation, Nitrifikation, mikrobielle Biosynthese, regieren auch die Verlustgefahr. Die Beschaffenheit der organischen Substanz und die Stickstoffquelle sind denn zu berücksichtigen.

Die Stickstoffeinsparung erfordet die Verminderung dieser Verluste. Die Laborversuchen ermöglichen die, diese Verflüchtigung induzierenden Faktoren näher zu kommen. Die Einschätzung der Erscheinung im Feld nimmt man durch indirekte isotopische Methoden vor, oder durch die Untersuchung des Ammoniakausströmung in die Luft bei Einbeziehung der Umweltfaktoren.

РЕЗЮМЕ

Улетучивание аммониака.

I. — Влияние природы почвы и азотных соединений.

ФОРИЕ ЖЕНЕВЬЕВА, БАРДЕН Р.

Улетучивание аммониака в атмосферу при внесении азотных удобрений является следствием различных путей превращения аммония в почве : потребление растениями и микроорганизмами, фиксация глинисто-гуминовым комплексом.

Улетучивание зависит от типа почвы. Действие равновесных состояний : $NH_4 + OH^- \rightleftarrows NH_3 + H_2O$ и $NH_4^+ +$ коллоид $\rightleftarrows$ коллоид — NH^+, кислотность и емкость обмена, определяет содержание свободного NH_3.

Таким образом, увеличение pH с 7 до 8, вызывает потери равные от 10 до 70 % внесенных количеств азота. Сокращенное улетучивание при емкостях обмена превышающих 20 мэ/100 $г^{-1}$ может иногда увеличиться до 20-75 % при емкостях обмена ниже 10 мэ/100 $г^{-1}$.

Но, улетучивание азота зависит также от форм принимаемых аммониаком при его перемещениях в почве. Природа азотных соединений, их концентрация, состав и способ внесения, играют также известную роль.

Увеличение улетучивающихся количеств азота наблюдалось в следующем порядке для исследованных удобрений : NH_4NO_3 ; $(NH_4)_2SO_4$; $(NH_2)_2CO$, NH_4OH, причем применение мочевины и аммониака благоприятствовали увеличению pH. Эффект дозы находится в соотношении с емкостью обмена, а смешивание соединения с почвой, улучшающее его распределение, уменьшает потери азота.

Интенсивность разных микробиологических процессов : аммонификации, нитрификации и иммобилизации влияют на размеры улетучивания. На этом уровнеприрода органического вещества почвы и источника азота имеют также известное влияние.

Экономия азота требует уменьшения этих потерь. Лабораторное изучение позволяет выделить факторы индуцирующие улетучивание. Оценка явления в поле проводится с помощью косвенных изотопических методов, или изучения тока аммониака в атмосфере, с принятием во внимание факторов окружения.

Références bibliographiques

ACQUAYE D. K., CUNNINGHAM R. K., 1965. Losses of nitrogen by ammonia volatilization from surface-fertilized tropical forest soils. *Trop. Agr. Trinidad*, **42,** 281-292.

ALLISON F. E., DOETSCH J. H., ROLLER E. M., 1951. Ammonium fixation and availability in Harpster clay loam. *Soil Sci.*, **72,** 187-200.

AVNIMELECH Y., LAHER M., 1977. Ammonia volatilization from soils : equilibrium considerations. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 1080-1084.

AXLEY J. H., LEGG J. O., 1960. Ammonium fixation in soils and the influence of potassium on nitrogen availability from nitrate and ammonium sources. *Soil Sci.*, **90,** 151-156.

BEAUCHAMP E. G., KIDD G. E., THURTELL G., 1978. Ammonia volatilization from sewage sludge applied in the field. *J. Environ. Qual.*, **7,** 141-146.

BLASCO M. L., CORNFIELD A. H., 1966. Volatilization of nitrogen as ammonia from acid soils. *Nature*, **212,** 1279-1280.

BREMNER J. M., DOUGLAS L. A., 1971. Inhibition of urease activity in soils. *Soil Biol. Biochem.*, **3,** 297-307.

BROWN J. M., BARTHOLOMEW W. V., 1963. Sorption of gaseous ammonia by clay minerals as influenced by sorbed aqueous vapor and exchangeable cations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27,** 160-164.

CHAO T. T., KROONTJE W., 1964. Relationships between ammonia volatilization, ammonia concentration and water evaporation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 393-395.

COFFEE R. C., BARTHOLOMEW W. V., 1964. Some aspects of ammonia sorption by soil surfaces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 485-490.

CORNFORTH I. S., CHESNEY H. A. D., 1971. Nitrification inhibitors and ammonia volatilization. *Plant and Soil*, **34,** 497-501.

DALAL R. C., 1975. Urease activity in some Trinidad soils. *Soil Biol. Biochem.*, **7,** 5-8.

DENMEAD O. T., FRENEY J. R., SIMPSON J. R., 1976. A closed cycle within a plant canopy. *Soil Biol. Biochem.*, **8,** 161-164.

EHR K. T., ELRICK D. E., THOMAS R. L., CORKE C. T., 1967. Dynamics of nitrification in soils using a miscible displacement technique. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31,** 383-389.

ERNST J. W., MASSEY H. F., 1960. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24,** 87-90.

FAURIE G., 1977. Etude *in vitro* du rôle de la nitrification sur la lixiviation du calcium en sols calcaires. *Science du Sol, Bull. A. F. E. S.*, **4,** 207-218.

FAURIE G., BARDIN R., 1971. Effet de l'apport d'azote organique et inorganique à des sols de pelouses xérophiles : influence du phosphore. *Soil Biol. Biochem.*, **3,** 57-67.

FAURIE G., JOSSERAND A., BARDIN R., 1975. Influence des colloïdes argileux sur la rétention d'ammonium et la nitrification. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **12,** 201-210.

FEAGLEY S. E., HOSSNER L. R., 1978. Ammonia volatilization reaction mechanism between ammonium sulfate and carbonate systems. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **42,** 364-367.

FENN L. B., 1975. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. III. — Effects of mixing low and high loss ammonium compounds. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39,** 366-368.

FENN L. B., KISSEL D. E., 1973. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. I. — General theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37,** 855-859.

FENN L. B., KISSEL D. E., 1974. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. II. — Effects of temperature and rate of ammonium nitrogen applications. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **38,** 606-610.

FENN L. B., KISSEL D. E., 1975. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. IV. — Effect of calcium carbonate content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39,** 631-633.

FENN L. B., KISSEL D. E., 1976. The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **40,** 394-398.

GASSER J. K. R., 1964. Some factors affecting losses of ammonia from urea and ammonium sulfate applied to soils. *J. Soil Sci.*, **15,** 258-272.

GANRY F., GUIRAUD G., 1978. Mode d'application du fumier et bilan azoté dans un système mil-sol sableux du Sénégal. Etude au moyen de ^{15}N. *Colloque Intern. Emploi des Isotopes et Rayonnements dans la Recherche en Phytopédologie*. Colombo, déc. 1978, IAEA SM 235/16.

HANAWALT R. B., 1969. Soil properties affecting the sorption of atmospheric ammonia. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33,** 725-729.

HARMSEN G. W., KOLENBRANDER G. J., 1965. Soil inorganic nitrogen. In *Soil Nitrogen*. Agronomy 10, Amer. Soc. Agron., Bartholomew and Clark Ed., Madison, Wisconsin, 43-92.

HARMSEN G. W., VAN SCHREVEN D. A., 1955. Mineralization of organic nitrogen in soil. *Adv. Agron.*, **7,** 299-398.

HUTCHINSON G. L., MILLINGTON R. J., PETERS D. B., 1972. Atmospheric ammonia : absorption by plant leaves. *Science*, **175,** 771-772.

JACKSON M. L., CHANG S. C., 1947. Anhydrous ammonia retention as influenced by depth of application, soil texture, moisture content, pH value and tilth. *J. Amer. Soc. Agron.*, **39,** 623-633.

JEWITT T. N., 1942. Loss of ammonia from ammonium sulfate applied to alkaline soils. *Soil Sci.*, **54,** 401-409.

KAMPFE K., ANSORGE H., 1973. Einfluss varrierter Injektionstiefen und Injektionuszinkenabstände auf Ertrag und Nährstoffentzung ausgewählter Pflanzen bei Anwendung von wasserfreiem Ammoniak. *Arch. Acker. u. Pflanzenbau. u. Bodenkd*, **17,** 217-222.

KISSEL D. E., BREWER H. L., ARKIN G. F., 1977. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 1133-1138.

KRESGE C. B., SATCHELL D. D., 1960. Gaseous loss of ammonia from nitrogen fertilizers applied to soils. *Agron. J.*, **52,** 104-107.

LARSEN S., GUNARY E., 1962. Ammonia loss from ammoniacal fertilizers applied to calcareous soils. *J. Sci. Food Agric.*, **13,** 566-572.

LAUER D. A., BOULDIN D. R., KLAUSNER S. D., 1976. Ammonia volatilization from dairy manure spread on the soil surface. *J. Environ. Qual.*, **5,** 134-141.

LIPPOLD H., HEBER R., FORSTER I., 1975. Ammoniakverluste bei Harnstoffdüngung. I. — Mitteilung : Modellversuche zur Ammoniakverflüchtigung in Abhängigkeit von pH-Wert ; Austauschkapazität, Temperatur und Wassergehalt der Böden. *Arch. Acker. u. Pflanzenbau. u. Bodenkd.*, **19,** 619-630.

LOFTIS J. R., SCARSBROOK C. E., 1969. Ammonia volatilization from ratios of formamide and urea solutions in soils. *Agron. J.*, **61,** 725-727.

LUEBS R. E., DAVIS K. R., LAAG A. E., 1974. Diurnal fluctuation and movement of atmospheric ammonia and related gases from dairies. *J. Environ. Qual.*, **3,** 265-269.

Mc DOWELL L. L., SMITH G. E., 1958. The retention and reactions of anhydrous ammonia on different soil types. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22,** 38-42.

MACRAE I. C., ANCAJAS R., 1970. Volatilization of ammonia from submerged tropical soils. *Plant and Soil*, **33,** 97-103.

MAHENDRAPPA M. K., OGDEN E. D., 1973. Patterns of ammonia volatilization from a forest soil. *Plant and Soil*, **38,** 257-265.

MARTIN J. P., CHAPMAN H. D., 1951. Volatilization of ammonia from surface fertilizers soils. *Soil Sci.*, **71,** 25-34.

MATOCHA J. E., 1976. Ammonia volatilization and nitrogen utilization from sulfur-coated ureas and conventional nitrogen fertilizers. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **40,** 597-601.

MEYER R. D. A., OLSON R. A., RHODES H. F., 1961. Ammonia loss from fertilized Nebraska soil. *Agron. J.*, **31,** 380-382.

MILLER R. J., SMITH R. B., 1976. Nitrogen balance in the southern San Jaoquin Valley. *J. Environ. Qual.*, **5,** 274-278.

MILLS H. A., BARKER A. V., MAYNARD D. N., 1974. Ammonia volatilization from soils. *Agron. J.*, **66,** 355-358.

MISRA S. G., SINGH B., 1970. Effect of different treatments on volatilization losses of nitrogen. *Bol. Inst. nacion. Invest. agron. Esp.*, **30,** 91-98.

MIYAMOTO S., RYAN J., STROEHLEIN J. L., 1975. Sulfuric acid for the treatment of ammoniated irrigation water. I. — Reducing ammonia volatilization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39,** 544-548.

MOE P. G., 1967. Nitrogen losses from urea as affected by altering soil urease activity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31,** 380-382.

MORRISON I. K., FOSTER N. W., 1977. Fate of urea fertilizer added to a boreal forest Pinus banksiana Lamb. Stand. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 441-448.

MORTLAND M. M., WOLCOTT A. R., 1965. Sorption of inorganic nitrogen compounds by soil materials. In *Soil Nitrogen*, Agronomy 10, Bartholomew and Clark Ed... Madison, Wisconsin, 150-197.

NELSON D. W., BREMNER J. M., 1966. An evaluation of Mogilevkina's method of determining fixed ammonium in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30,** 409-410.

NELSON L. B., HAUCK R. D., 1965. Nitrogen fertilizers : progress and problems. *Agric. Sci. Rev.*, **3,** 38-47.

NOMMIK, 1965. Ammonium fixation and other reactions involving a nonenzymatic immobilization of mineral nitrogen in soil. In *Soil Nitrogen*, Agronomy 10, Bartholomew and Clark Ed., Madison, Wisconsin, 198-257.

NOMMIK H., 1973. Assessment of volatilization loss of ammonia from surface-applied urea on forest soil by N^{15} recovery. *Plant and Soil*, **38,** 589-603.

OVERREIN L. N., 1968. Lysimeter studies on tracer nitrogen in forest soil. I. — Nitrogen losses by leaching and volatilization after addition of urea ^{15}N. *Soil Sci.*, **106,** 280-291.

OVERREIN L. N., MOE P. G., 1967. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31,** 57-61.

PARR J. F., 1969. Retention of anhydrous ammonia by soil : IV. — Recovery of microbiological activity and effect of organic amendments. *Soil Sci.*, **107,** 94-104.

PARR J. F., Jr, PAPENDICK R. I., 1966. Retention of ammonia in soils. In *Agricultural anhydrous ammonia technology and use*. Mc Vickar, Martin, Miles and Tucker Ed., 213-236.

PLESSIS du M. C. F., KROONTJE W., 1964. The relationship between pH and ammonia equilibria in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 751-754.

POCHON J., TCHAN Y. T., 1947. Recherches sur les phénomènes biologiques d'ammonification dans le sol. *Ann. Inst. Pasteur, Paris*, **73,** 696-700.

POCHON J., TCHAN Y. T., CHALVIGNAC M. A., CHALAUST R., 1947. Recherches sur les processus biologiques d'ammonification dans le sol. *Ann. Inst. Pasteur, Paris*, **73,** 1118-1121.

PORTER L. K., VIETS F. G., HUTCHINSON G. L. Jr, 1972. Air containing Nitrogen-15 : foliar absorption by corn seedlings. *Science*, **175,** 759-761.

PRASAD M., 1976. Gaseous loss of ammonia from sulfur-coated urea, ammonium sulfate and urea applied to calcareous soil (pH 7,3). *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **40,** 130-143.

PRATT P. F. et al. 1977. Effect of increased nitrogen fixation on stratospheric ozone. *Climatic change*, **1,** 109-135.

PUGH K. B., WAID J. S., 1969. The influence of hydroxamates on ammonia loss from an acid loamy sand treated with urea. *Soil Biol. Biochem.*, **1,** 195-206.

RAISON R. G., Mc GARITY J. W., 1978. Effect of plant ash on nitrogen fertilizer transformations and ammonia volatilization. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **42,** 140-143.

RAJU G. S. N., MUKHOPADHYAY A. K., 1977. Influence of other exchangeable cations on fixation of subsequently added NH_4^+ in soils. *Agrochimica*, **21,** 415-420.

ROBINSON E., ROBBINS R. C., 1970. Gaseous nitrogen compound polluants from urban and natural sources. *J. Air. Pollut. Contr. Ass.*, **20,** 303-306.

RYAN J. A., KEENEY D. R., 1975. Ammonia volatilization from surface applied wastewater sludge. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **47,** 386-393.

SHIMPI S. S., SAVANT., 1975. Influence of sorbed cations on ammonia retention capacity of tropical soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39,** 152-153.

SIMPSON J. R., 1968. Losses of urea nitrogen from the surface of pasture soils. *Trans. Intern. Congr. Soil Sci.*, 9th Congr. Adelaïde. **2,** 459-466.

TERMAN G. L., HUNT C. M., 1964. Volatilization losses of nitrogen from surface applied fertilizer as measured by crop response. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 667-672.

VAN VEEN J. A., 1977. *The behaviour of nitrogen in soil. A computer simulation model.* Thesis Wageningen, 164 p.

VOLK G. M., 1959. Volatile loss of ammonia following surface applications of urea to turf and bare soils. *Agron. J.*, **51,** 746-749.

VOLK G. M., 1961. Gaseous loss of ammonia from surface-applied nitrogenous fertilizers. *J. Agr. Food Chem.*, **9,** 280-283.

VOLK G. M., 1970. Gaseous loss of ammonia from pilled urea applied to slash pine. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34,** 513-516.

WAGNER G. H., SMITH G. E., 1958. Nitrogen losses from soils fertilized with different nitrogen carriers. *Soil Sci.*, **85,** 125-129.

WAHHAB A., RANDHAWA M. S., ALAM S. Q., 1957. Loss of ammonia from ammonium sulfate under different conditions when applied to soils. *Soil Sci.*, **84,** 249-255.

WATKINS S. H., STRAND R. F., DEBELL D. S., ESCH J. Jr, 1972. Factors influencing ammonia losses from urea applied to northwestern forest soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36,** 354-357.

WATSON G. A., CHIN T. T., WONG P. W., 1962. Loss of ammonia by volatilization from surface dressings of urea in Hevea cultivations. *J. Rubber Research Inst. Malaya*, **17,** 77-90.

ZANTUA M. I., BREMNER J. M., 1976. Production and persistence of urease activity in soils. *Soil Biol. Biochem.*, **8,** 369-374.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 2-1980

Dépôt légal : 1er trimestre 1980. N° d'impression : 26761

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1979	France Prix T.T.C.	Étranger Prix Net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix Net
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOLOGIE - ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	335 F	370 F	72 F	72 F

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 80 F — Étranger sauf R. F. A. : 130 F
— Le numéro: France : 25 F — Étranger sauf R. F. A. : 40 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... 230,00 F

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... 55,00 F

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... 300,00 F

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... 80,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... 60,00 F

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... 27,00 F

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... 38,00 F

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... 168,50 F

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... 168,50 F

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... 95,50 F

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... 63,50 F

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... 134,50 F

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... 173,00 F

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1979, **30** (4), 305-385.

Table des matières

J. DECAU, G. DUTHEN et B. PUJOL. — Arrière-effet des fumures azotées sur les bilans économique, énergétique et azoté des fumures des cultures ultérieures. Analyse théorique du problème et résultats expérimentaux 305

C. DUTHION. — Pouvoir réducteur des racines des plantes cultivées. Ses modifications par une courte période d'excès d'eau 323

A. PERRIER et M. HALLAIRE. — Rapport de l'évapotranspiration potentielle calculée à l'évaporation mesurée sur bac. I. — Justification d'une relation expérimentale obtenue en zone tropicale 329

A. PERRIER et M. HALLAIRE. — Rapport de l'évapotranspiration potentielle calculée à l'évaporation mesurée sur bac. II. — Expression en fonction d'un facteur de déséquilibre hydrique entre les surfaces évaporantes et l'air 337

Ch. RIOU, J. P. LAGOUARDE et R. CHARTIER. — Evaporation du sol nu en zone semi-aride et en conditions hivernales. Relations avec l'albédo et la température de la surface du sol.... 347

G. FAURIE et R. BARDIN. — La volatilisation de l'ammoniac : I. — Influence de la nature du sol et des composés azotés..... 363

CONTENTS

J. DECAU, G. DUTHEN, B. PUJOL. — After-effect of nitrogen fertilizers on the economic, energetic and nitrogen balance of subsequent crops fertilization. Theoretical analysis of the problem and observed experimental data 305

C. DUTHION. — Reducing ability of cultivated plant roots and how a short period of excess water modifies it..... 323

A. PERRIER, M. HALLAIRE. — Ratio between calculated potential evapotranspiration and pan-evaporation. I. — Justification of an experimental relation set in tropical zone..... 329

A. PERRIER, M. HALLAIRE. — Ratio between calculated potential evapotranspiration and pan-evaporation. II. — Expression as a function of an equilibrium factor between evaporating surfaces and air..... 337

Ch. RIOU, J. P. LAGOUARDE, R. CHARTIER. — Evaporation from bare soil in semi-arid country during the cold season. Relations with albedo and soil surface temperature 347

G. FAURIE, R. BARDIN. — Volatilization of ammonia. I. — Influence of the nature of soil and nitrogen compounds 363

Les Annales agronomiques figurent dans current contents

I. N. 9.036.004.5

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 5

inra

AAG
30.5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 30 (5) 387-467 (1979)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris-Grignon, Paris Cedex 05.

Annales de Zoologie - Écologie animale.

— B. HURPIN, Chef du Département de Recherches de Zoologie, 78280 Guyancourt.

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur scientifique du Centre de Recherches de Nantes, 44076 Nantes.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— B. VISSAC, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— P. LARVOR, Directeur de la Station de Physiopathologie de la Nutrition, Theix, Saint-Genès Champanelle, 63110 Beaumont.

Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique. Pour les « Annales de Biochimie animale, Biochimie, Biophysique », Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante : Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 Jouy-en-Josas.

— C. THIBAULT, Directeur de Recherches à l'I. N. R. A., C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES, Tél. : 950-75-22

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1979, **30** (5), 387-399.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage.

I. — Etude statistique

J. GUÉRIF et A. FAURE

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches d'Avignon, I.N.R.A.,
Domaine St Paul, 84140 Montfavet

Résumé

L'étude des relations entre la matière organique et les points caractéristiques d'une courbe de compactage Proctor est entreprise statistiquement sur une centaine de matériaux naturels.

La matière organique induit :

— une augmentation de la teneur en eau au seuil hydrique de sensibilité au compactage ou limite de plasticité,

— une diminution de la densité et une augmentation de la teneur en eau au maximum de compacité.

Ces résultats ont pour conséquence une augmentation de l'indice de plasticité tel que nous le définissons par le test Proctor.

Les relations linéaires proposées supposent une hypothèse d'additivité entre la matière organique et la phase argile, mais aucun mécanisme particulier ne peut être avancé car la variable matière organique totale masque la diversité des constituants organiques susceptibles d'intervenir.

Une prochaine étape consistera à provoquer des modifications du comportement mécanique d'un matériau de manière à dissocier les rôles des matières organiques liées à la phase argile de ceux des matières organiques libres.

Introduction

Des travaux récents sur le comportement au compactage des sols (Faure, 1978) ont montré, au travers du test Proctor, que l'on peut définir, pour une même énergie de compactage, des humidités du matériau correspondant à des seuils hydriques de changement d'état (solide, plastique, liquide).

Ces seuils, par comparaison avec les limites d'Atterberg qui donnent un critère global de classification des sols, présentent l'intérêt d'être établis pour une même énergie. On peut ainsi caractériser les comportements mécaniques des matériaux terreux.

L'auteur a montré, pour des matériaux strictement minéraux, que ces seuils dépendent étroitement de la composition granulométrique du matériau et principalement de la teneur et de la nature minéralogique de la phase argile. Mais la seule composition granulométrique et minéralogique ne permet pas d'expliquer le comportement des sols agricoles dans les conditions naturelles.

La matière organique joue, en effet, un rôle non négligeable vis-à-vis de ce phénomène. On considère en général, dans la littérature, qu'elle a un effet protecteur vis-à-vis du compactage au champ (Howard *et al.*, 1959 ; Tietjen et Jaurlandt, 1974 ; Russel *et al.* cités par Taylor *et al.*, 1959).

On peut citer des travaux qui, sans préjuger des mécanismes, ont mis en évidence des relations entre la densité à l'optimum Proctor et la teneur en matière organique totale (Free *et al.*, 1947 ; Soane *et al.*, 1972 ; Manière, 1973). Toutes indiquent que cette densité diminue quand le taux de matière organique augmente.

On trouve par ailleurs (Monnier, 1965 ; Rémy, 1971 ; Chassin, 1975) que la matière organique agit souvent en interaction avec la phase argile.

Enfin, on a constaté lors d'un essai d'apport massif de matière organique dans des sols de serres (Monnier et Guérif) qu'elle provoque pour ces matériaux des augmentations des teneurs en eau aux seuils hydriques de changement d'état ainsi qu'une diminution générale de la compacité.

Pour aborder l'étude de ces phénomènes, la difficulté de caractériser ou de modéliser à priori la matière organique nous a conduits à adopter une démarche statistique sur des matériaux naturels.

Après avoir présenté la population de sols étudiés et la méthode de compactage utilisée et après avoir rappelé les principaux éléments d'interprétation du comportement d'un matériau terreux au compactage, nous tenterons de préciser le sens et l'intensité de l'effet de la matière organique sur les seuils hydriques de changement d'état.

I. — Matériel et méthodes, rappel des principales caractéristiques du comportement d'un sol au compactage

1.1. — *Notations utilisées*

$\bar{\gamma}_d$	densité sèche du matériau après compactage Proctor.	en g/g
W	teneur en eau pondérale du matériau au moment du compactage.	
W_c	teneur en eau pondérale au seuil de sensibilité au compactage.	
W_m	teneur en eau pondérale au maximum de compacité.	
LP_6	limite inférieure de plasticité (à 6 kg.cm/cm³).	
LL_6	limite de liquidité (à 6 kg.cm/cm³).	
IP_6	indice de plasticité (à 6 kg.cm/cm³).	
W_m^*	limite de liquidité dans les conditions de l'essai.	
A	teneur en argile de l'échantillon.	
W_a	teneur en eau pondérale de la phase argile au seuil de sensibilité au compactage.	
MO	teneur en matière organique (méthode d'Anne).	
ε	résidus de la régression.	
$\sigma(\varepsilon)$	écart-type des résidus.	
$t_{0,05}$	valeur du « t » de Student pour une erreur de 5 p. 100.	

N. B. Dans les graphiques, les teneurs sont exprimées en p. 100.

1.2. — *Matériel et méthodes*

L'échantillon comporte quatre-vingt-dix individus provenant du Bassin Parisien, du Pays d'Ouche et de la Drôme.

Mis à part une dizaine d'individus, dont nous avons relevé les caractéristiques dans la littérature, nous avons pratiqué sur ces matériaux les mesures suivantes :

— analyse granulométrique (cinq fractions) (fig. 1) ; dans ce qui suit, on appellera phase argile, la fraction minérale inférieure à 2 μ ;

— dosage de la matière organique (méthode d'Anne) ;

— dosage du calcaire total ;

— essai de compactage Proctor.

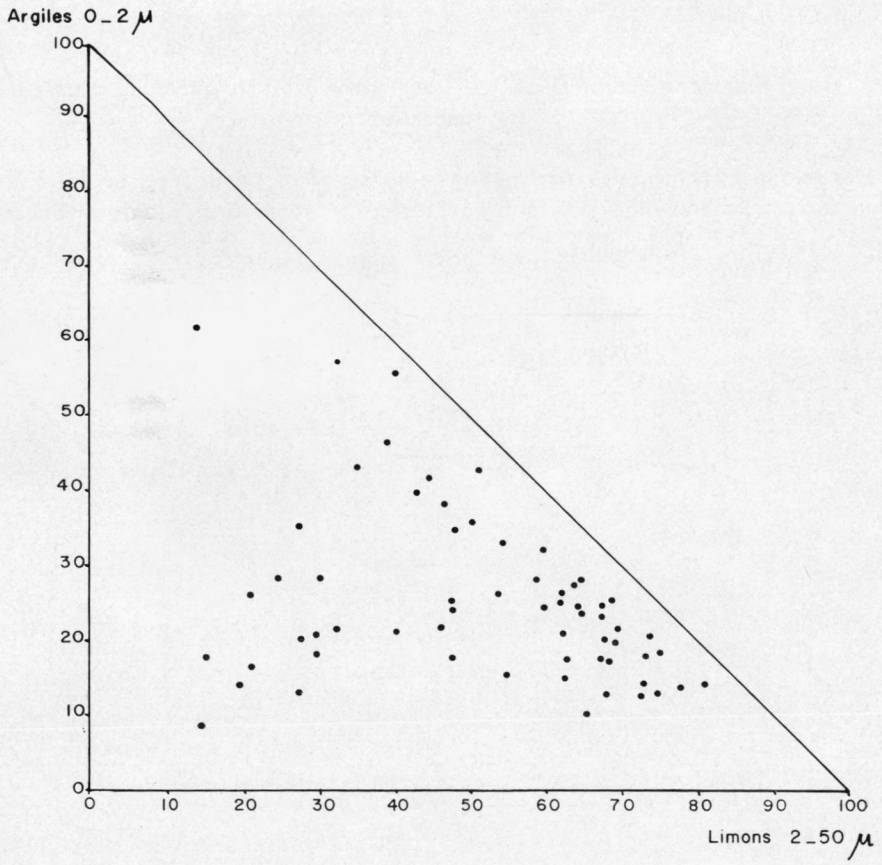


FIG. 1. — *Constitution granulométrique des sols.*
Soil constitution.

Si le protocole de compactage proprement dit reste inchangé par rapport au protocole standard Proctor, nous ne réutilisons pas de matériau déjà compacté.

Le matériau prélevé *in situ* est séché à 105 °C, puis humecté par vaporisation

jusqu'à obtention du poids d'eau désiré ; pour homogénéiser l'humidité, il est laissé à température constante pendant 8 jours environ.

Le compactage est effectué dans les conditions suivantes :

Moule :	diamètre	7 cm
	volume	300 cm^3
Dame :	masse	1 kg
	hauteur de chute	20 cm
	nombre de couches ...	3
	nombre de coups	30
Energie de compactage		6 kg cm/cm^3 ou 590 kJ/m^3

Le poids sec est obtenu après séchage à 105 °C jusqu'à ce que la perte de poids soit nulle (environ 8 jours).

1.3. — *Eléments d'interprétation du comportement d'un matériau minéral au compactage*

Rappelons les principales informations que l'on peut obtenir à partir des courbes de compactage Proctor (fig. 2) où sont représentées les variations de la densité sèche $\overline{\gamma}_d$

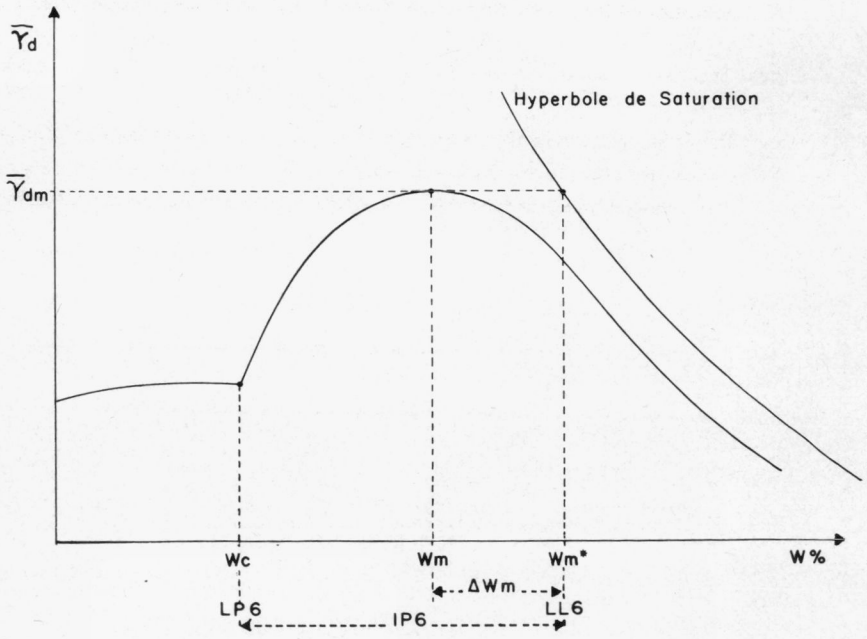


FIG. 2. — *Courbe de compactage.*
Compaction curve.

de l'échantillon en fonction de son humidité pondérale W exprimée en g pour 100 g de matériau déshydraté à 105 °C (Faure, 1978), $\overline{\gamma}_d$ étant défini comme suit :

$$\bar{\gamma}_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

où $\gamma_d = \frac{P}{v}$ avec

γ_d : poids volumique sec du matériau

P : poids après dessiccation à l'étuve à 105 °C

v : volume de l'échantillon après compactage à l'humidité W

γ_w = poids volumique de l'eau

Trois régions peuvent être définies :

— $W < W_c$: dans cette partie de la courbe, la compacité de l'éprouvette varie peu, les variations de faibles amplitudes résultent du concassage des agrégats d'une part et de leur gonflement d'autre part.

— $W_c < W < W_m$: la densité $\bar{\gamma}_d$ est une fonction croissante de W jusqu'à un maximum proche de la courbe de saturation, obtenu pour W_m. Dans cette partie de la courbe, la pente traduit l'efficacité de l'argile comme lubrifiant dans l'arrangement des grains au compactage.

W_c est appelé seuil hydrique de sensibilité au compactage. Il correspond à la limite inférieure de plasticité dans les conditions de l'essai (LP_6).

— $W > W_m$: l'écart expérimental entre la courbe Proctor et l'hyperbole de saturation correspond à la présence de gaz piégés dans l'échantillon.

W_m est appelé teneur en eau du maximum de compacité $\bar{\gamma}_{dm}$. Si la technique permet l'élimination des gaz, ce maximum se trouve sur la courbe de saturation (1) ; il correspond alors à la limite de liquidité dans les conditions de l'essai $W_m^* = LL_6$; en effet, aux teneurs en eau supérieures à W_m^*, le matériau, saturé en eau, est devenu incompressible : son état correspond à la définition de la liquidité mécanique : le matériau est déformable à volume constant. La différence $W_m^* - W_c$ est donc l'équivalent d'un indice de plasticité pour l'énergie de compactage considérée.

Dans ce qui suit, les valeurs numériques de W_c, de W_m et de W_m^* sont obtenues par lecture des graphiques de compactage Proctor.

II. — Résultats et discussion

2.1. — *Variation du seuil hydrique de sensibilité au compactage*

Afin de comparer des matériaux de granulométries différentes, nous avons ramené la teneur en eau du seuil de sensibilité au compactage W_c à la teneur en argile A.

En effet, Faure (1971) a montré, sur des mélanges sable-kaolinite que le rapport W_c/A est une constante à une énergie de compactage donnée. Cette teneur en eau W_a de la phase argile correspond à l'humidité pour laquelle l'argile acquiert un comportement plastique à l'énergie considérée.

On sait, par ailleurs, que l'influence de la matière organique sur des comportements physiques est d'autant mieux interprétée qu'elle est exprimée en terme d'interaction de l'argile et de la matière organique.

---

(1) Ce maximum sur la courbe de saturation ne peut être obtenu par l'expérience. Compte tenu de l'allure générale des courbes Proctor, nous pouvons considérer, en première approximation, que γ_{dm}^* est peu différent de γ_{dm}, ce qui permet d'approcher la valeur de γ_m^*, sans grande erreur par une construction graphique simple.

C'est pour ces deux raisons que l'on a tenté de modéliser l'effet de la matière organique sur le seuil de sensibilité au compactage d'un matériau donné, par une relation de la forme :

$$\frac{W_c}{A} = W_a + b\,\frac{MO}{A} \qquad (1)$$

qui s'écrit encore :

$$W_c = W_a\,A + bMO\,.$$

Pour la population de sols étudiés, on pose alors une relation de la forme :

$$W_c = \alpha A + bMO + \varepsilon_c \qquad (1\ bis)$$

où α serait une estimation statistique de la moyenne des valeurs réelles des W_a spécifiques à chacune des argiles rencontrées dans l'échantillon. Pour ne pas prendre en compte l'effet des carbonates qui augmentent la teneur en eau au seuil hydrique de sensibilité au compactage (Souty, 1978), les matériaux carbonatés ont été éliminés de l'échantillon.

Si $\widehat{W}_c$ est l'estimateur de W_c, on obtient pour les cinquante-cinq individus de la population, dépourvus de calcaire, les valeurs numériques suivantes :

$$\widehat{W}_c = 0{,}27\,A + 1{,}52\,MO \qquad (2)$$

avec, entre W_c et $\widehat{W}_c$, un coefficient de corrélation $r = 0{,}84^{**}$.

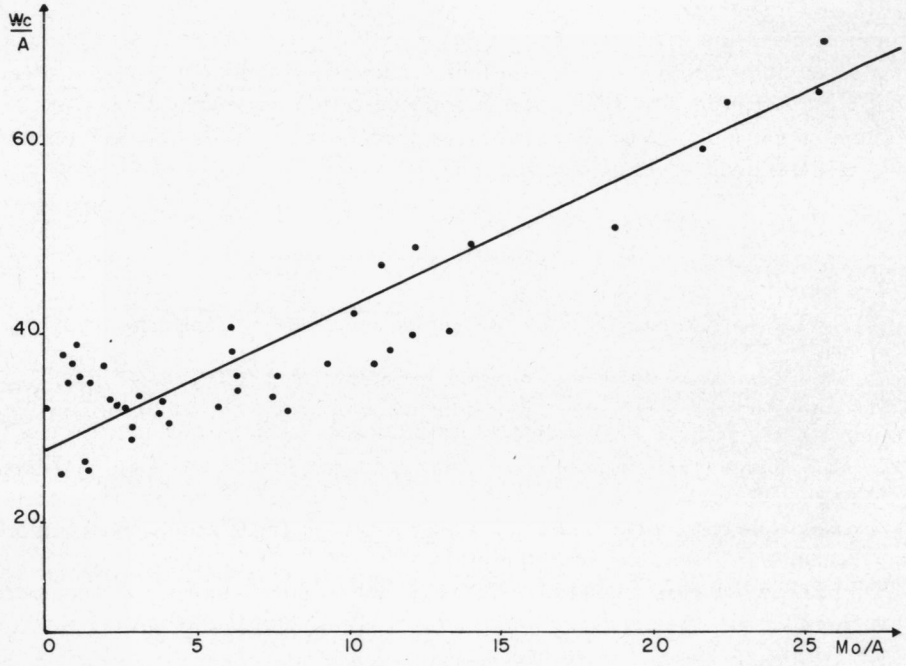


FIG. 3. — *Relation entre la teneur en eau au seuil de sensibilité au compactage et la teneur en matière organique.*

Relationship between plastic limit and organic matter content.

Si $S(\varepsilon_c)$ est l'écart-type des résidus ε_c, on a, pour 5 p. 100 d'erreur :

$$W_c = \widehat{W}_c \pm S(\varepsilon_c)\, t_{0,05} = \widehat{W}_c \pm 0{,}011\, t_{0,05}$$
$$W_c = \widehat{W}_c \pm 0{,}024\,3 .$$

Si on examine la répartition des points autour de cette droite de régression (fig. 3), on constate que les résidus sont d'autant plus élevés en valeur absolue que les valeurs du rapport MO/A sont faibles.

On peut donner de cette remarque deux hypothèses explicatives compatibles entre elles :

— le petit nombre de points pour les valeurs élevées du rapport MO/A ne permet pas de juger de leur dispersion ;

— l'existence d'un seuil de MO/A au-delà duquel la matière organique masque les effets spécifiques de la phase argile sur ses propriétés d'hydratation.

Remarquons que la linéarité du modèle utilisé suppose une hypothèse d'additivité telle qu'à la quantité d'eau nécessaire pour que l'argile seule entre en plasticité (à une énergie donnée) vienne s'ajouter une quantité d'eau imposée par la présence de matière organique pour que le système phase argile-matière organique, dans son ensemble, entre en plasticité (à cette même énergie).

2.2. — *Variation du maximum de compacité*

2.2.1. *Teneur en eau au maximum* : W_m.

Les corrélations reliant W_m à A et MO d'une part et à W_c d'autre part, suggèrent d'utiliser une expression identique à celle proposée pour W_c, soit :

$$W_m = a_1 A + b_1 MO + c_1 + \varepsilon_m . \qquad (3)$$

Sur quatre-vingt-onze individus, l'équation de régression s'écrit :

$$\widehat{W}_m = 0{,}246\, A + 1{,}642\, MO + 0{,}089\,9 \qquad (4)$$

avec, entre W_m et $\widehat{W}_m$, un coefficient de corrélation hautement significatif tel que $r = 0{,}90$. Si $S(\varepsilon_m)$ est l'écart-type des résidus ε_m, on a, pour 5 p. 100 d'erreur :

$$W_m = \widehat{W}_m \pm S(\varepsilon_m)\, t_{0,05} = \widehat{W}_m \pm 0{,}017\,9\, t_{0,05}$$
$$W_m = \widehat{W}_m \pm 0{,}040\,8 .$$

Cette hypothèse linéaire est une simplification de la forme obtenue par Faure (1971) sur des matériaux strictement minéraux FK et BK où, pour deux squelettes donnés (F et B), il a fait varier la teneur en argile (K) (cf. fig. 4) :

$$W_m = a_0\, e^{-\lambda A} + b_2 A + c_2 . \qquad (5)$$

Pour les teneurs en argile supérieure à 25 p. 100, les deux courbes FK et BK sont confondues et W_m est proportionnelle à A.

Pour les teneurs en argile inférieure à 25 p. 100, on constate l'effet spécifique de chaque squelette, et l'existence d'un minimum pour 10 p. 100 d'argile.

La forme de la relation traduit l'existence de ce minimum, les valeurs de a_0 et de λ étant spécifiques du squelette considéré.

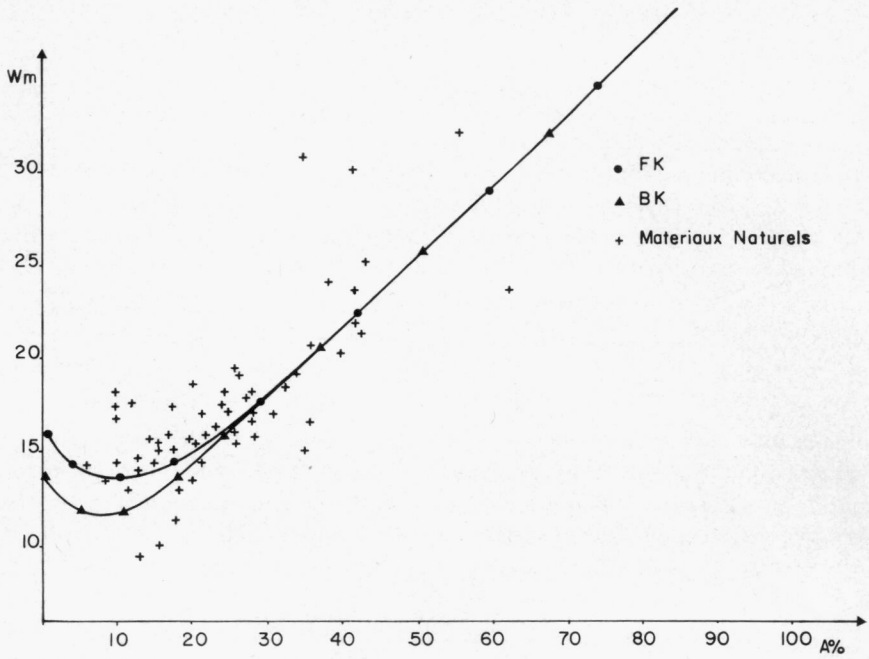


FIG. 4. — *Relation entre la teneur en eau au maximum Proctor et la teneur en argile.*
Relationship between maximum compacity moisture content and clay content.

Dans notre cas, l'ajustement à un tel modèle ne se justifie pas, compte tenu de la diversité des squelettes des sols naturels étudiés. La forme linéaire utilisée (équations (3) et (4)), bien que ne transcrivant pas la réalité physique, met nettement en évidence l'influence de la matière organique sur la teneur en eau à l'optimum Proctor.

2.2.2. *Densité sèche au maximum* $\bar{\gamma}_{dm}$.

Comme pour la teneur en eau W_m au maximum Proctor, Faure (1971) a proposé une relation de la forme :

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_{dm}} = a_0 e^{-\lambda A} + b_3 A + c_3 \qquad (6)$$

où a_0 et λ sont les deux paramètres de l'équation (5), le terme $a_0 e^{-\lambda A}$ traduit l'effet propre à la nature du squelette pour des sols où la teneur en argile A est inférieure à 20 p. 100 ; au-delà, seul le facteur argile intervient et les courbes sont confondues (cf. fig. 5).

Pour des raisons analogues à celles invoquées au paragraphe précédent, nous avons testé un ajustement de la forme :

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_{dm}} = a_4 A + b_4 MO + c_4 + \varepsilon_\gamma . \qquad (7)$$

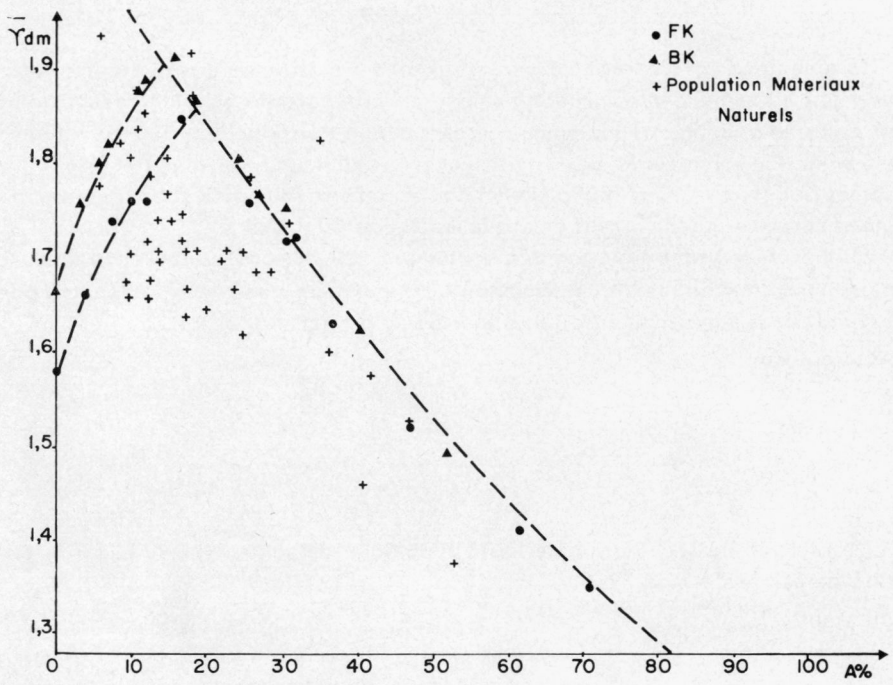


FIG. 5. — *Relation entre la densité sèche au maximum de compacité et la teneur en argile.*
Relationship between maximum bulk-density and clay content.

L'effet des squelettes des matériaux expérimentaux FK et BK ne se retrouve pas pour les sols naturels de la population analysée. Les squelettes des sols naturels ont une granulométrie beaucoup plus étalée. Ainsi, les sols où le squelette est essentiellement constitué de limons se trouvent situés sur l'hyperbole d'équation (7).

Les branches de courbes observées par Faure et traduites par l'expression $a_0\, e^{-\lambda A}$ traduisent l'effet propre à un squelette grossier et de granulométrie peu dispersée (200 à 500 μ).

Sur quatre-vingt-onze individus, l'équation de régression s'écrit :

$$\frac{\widehat{1}}{\bar{\gamma}_{dm}} = 0{,}197\ A + 2{,}645\ MO + 0{,}503 \qquad (8)$$

avec un coefficient de corrélation entre $1/\bar{\gamma}_{dm}$ et $\widehat{1/\bar{\gamma}_{dm}}$ hautement significatif ($r = 0{,}873^{**}$).

Si $S(\varepsilon_\gamma)$ est l'écart-type des résidus ε_γ, on a pour 5 p. 100 d'erreur :

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_{dm}} = \frac{\widehat{1}}{\bar{\gamma}_{dm}} \pm S(\varepsilon_\gamma)\, t_{0,05} \qquad S(\varepsilon_\gamma) = 0{,}023\ 5$$

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_{dm}} = \frac{\widehat{1}}{\bar{\gamma}_{dm}} \pm 0{,}054\,.$$

2.3. — *Ecart à l'hyperbole de saturation*

Comme nous l'avons rappelé au paragraphe 1.3, la technique de compactage ne permet pas d'atteindre la saturation parfaite. Il reste dans les échantillons strictement minéraux une quantité de gaz piégé correspondant à environ 3 p. 100 du volume de l'éprouvette. Ce volume n'est pas strictement constant. Il peut être plus élevé dans le cas de sables (A p. 100 $<$ 10 p. 100) où l'effet du squelette se fait particulièrement sentir, et il tend vers zéro quand la teneur en argile tend vers 100 p. 100.

Pour évaluer l'effet de la matière organique, nous allons comparer la teneur en eau expérimentale au maximum Proctor W_m à la teneur en eau W_m^* obtenue à partir de l'équation de l'hyperbole de saturation pour $\bar{\gamma}_{dm}$ (cf. fig. 2).

On posera :

$$\Delta W_m = W_m^* - W_m \,. \tag{9}$$

La condition de saturation s'écrit :

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_d} = \frac{1}{\bar{\gamma}_s} + W \tag{10}$$

où $\bar{\gamma}_d$ est la densité sèche du matériau à l'humidité de saturation W et où $\bar{\gamma}_s$ est la densité de solide du matériau.

Il vient :

$$W_m^* = \frac{1}{\bar{\gamma}_{dm}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_s} \,. \tag{10 \textit{bis}}$$

La densité de solide du matériau $\bar{\gamma}_s$ dépend de sa constitution aussi bien minéralogique qu'organique. Compte tenu de la variabilité de notre population de sols, nous prendrons pour la densité de solide du minéral la valeur moyenne de 2,70, et pour celle de la matière organique 1,43 (Stengel, 1979).

La densité de solide $\bar{\gamma}_s^{1-2}$ d'un mélange de deux constituants se calcule en posant :

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_s^{1-2}} = \frac{t_1}{\bar{\gamma}_s^1} + \frac{t_2}{\bar{\gamma}_s^2}$$

où $\bar{\gamma}_s^1$ et $\bar{\gamma}_s^2$ sont les densités de solide respectives des constituants 1 et 2, et où t_1 et t_2 sont les teneurs respectives des deux constituants dans le mélange.

En reportant les valeurs retenues de $\bar{\gamma}_s^1$ et de $\bar{\gamma}_s^2$, on trouve que :

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_s^{1-2}} = \frac{1{,}27\,MO + 1{,}43}{3{,}86} \,. \tag{12}$$

En portant $\bar{\gamma}_{dm}$ (équation (8)) et $\bar{\gamma}_s$ (équation (12)) dans l'équation (10 *bis*), il vient :

$$W_m^* = 0{,}197\,A + 2{,}316\,MO + 0{,}132\,5 \tag{13}$$

l'équation (9) s'obtient par différence de l'équation (13) et de l'équation (4) soit :

$$\Delta W_m = W_m^* - W_m = -\,0{,}049\,A + 0{,}674\,MO + 0{,}042\,6 \,. \tag{14}$$

Si on exprime l'équation (14) sous la forme :

$$\Delta W_m = 0{,}042\,6 + A\left[-\,0{,}049 + 0{,}674\,\frac{MO}{A}\right] = 0{,}042\,6 + \beta A$$

on voit que l'action de l'argile sur ΔW_m dépend de la valeur de MO/A par rapport à un seuil. Ainsi :

ΔW_m augmente avec A si $MO/A > 0{,}073$ $(\beta > 0)$

ΔW_m diminue quand A augmente si $MO/A < 0{,}073$ $(\beta < 0)$.

Cette notion de seuil d'action de la matière organique se retrouve pour des propriétés physiques extrêmement variées : stabilité structurale (Monnier, 1965), hydratation des argiles (Chassin, 1975), indice de plasticité d'Atterberg (Rémy, 1971).

2.4. — *Variations de l'indice de plasticité*

Les deux teneurs en eau critiques étudiées précédemment W_c et W_m correspondent aux seuils entre les états solide plastique et liquide à l'énergie de compactage considérée. On peut alors établir une analogie entre ces points particuliers de la courbe Proctor et les limites d'Atterberg (Faure, 1971 et 1978).

Ainsi, et contrairement aux limites définies par Atterberg, on est amené à comparer des limites de plasticité (W_c) et des limites de liquidité (W_m) pour une même énergie.

L'indice de plasticité est ainsi défini pour une valeur de l'énergie de compactage (6 kg cm/cm³).

On posera :

$$IP_6 = LL_6 - LP_6 = W_m^* - W_c .$$

A partir des équations (2) et (13), il vient :

$$IP_6 = -0{,}07\,A + 2{,}05\,MO + 0{,}1325$$

ou encore :

$$IP_6 = 0{,}132\,5 + A\left(-0{,}07 + 2{,}05\,\frac{MO}{A}\right) = 0{,}132\,5 + A\delta . \qquad (15)$$

En mettant IP_6 sous cette forme, on montre encore que le sens d'action de l'argile varie selon la valeur de MO/A par rapport à un seuil. Ainsi :

IP_6 augmente avec A si $MO/A > 0{,}034$ $(\delta > 0)$

IP_6 diminue quand A augmente si $MO/A < 0{,}034$ $(\delta < 0)$.

On retrouve ici cette notion de seuil d'action de la matière organique relativement au rapport MO/A déjà mis en évidence par Rémy (1971) sur l'indice de plasticité d'Atterberg.

Conclusion

C'est dans le but de faire apparaître le poids déterminant de la matière organique dans les propriétés mécaniques des sols que nous avons entrepris ce travail sur un échantillon de matériaux naturels et variés.

On a ainsi pu mettre en évidence le sens et l'intensité des phénomènes liés à la présence de matière organique dans les sols :

— variation de la compacité du matériau,

— variation des teneurs en eau aux seuils de changement d'état.

D'un point de vue plus synthétique, on constate que l'indice de plasticité à 6 kg cm/cm³, IP_6, est considérablement augmenté par la présence de matière organique.

L'explicitation de IP_6 et de l'écart à l'hyperbole de saturation, ΔW, suggère que ces deux variables sont tantôt croissantes tantôt décroissantes quand A varie, selon que le rapport MO/A est supérieur ou inférieur à un certain seuil.

Sous réserve de la précision des ajustements statistiques utilisées, il semblerait que ces seuils se situent en dessous des valeurs moyennes d'équilibre de MO/A de la couche arable de sols cultivés sous nos climats.

Dans une telle approche, la matière organique est prise en compte par une variable trop globale (dosage du carbone) car des constituants d'origine diverses et à différents stades d'évolution sont alors confondus.

La compréhension de l'action des matières organiques demande, après s'être affranchi des variations liées à la nature des constituants minéraux (hétérogénéité de la nature minéralogique des argiles, distribution et forme des éléments constitutifs du squelette) d'étudier l'influence de matériaux organiques choisis pour induire différents comportements mécaniques d'un même matériau.

Ainsi, parallèlement à la distinction entre la phase argile et le squelette, on pourra, dans une première approche, tenter de dissocier les rôles propres aux matières organiques liées à la phase argile de ceux des matières organiques libres.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Summary

Influence of organic matter on the mechanical behaviour of soils during compaction.
I. — Statistical study

Statistical relations between organic matter and consistency limits, as we define them by a compaction curve (Proctor test), are established from hundred different soils.

The organic matter :

— increases the water content at the plastic limit,
— decreases the bulk density and increases the water content at the liquid limit.

Consequently an increase of the plasticity index as we defined it by the Proctor test is observed.

Linear relations are given according to an hypothesis of an additive action of clay and organic matter, but no specific mechanism can be proposed.

As a matter of fact such an hypothesis is too simple : soil organic matter ought not to be represented by its sole carbon content because of the extreme difference of its components.

So in the next step, we will distinguish the organic matter bounded to the clay particles from the free organic matter.

In order to dissociate their proper influences, we will try to obtain different mechanical properties of the same soil by incorporating those two different fractions of the soil organic matter.

Zusammenfassung

Rolle des organischen Stoffes auf das Verhalten eines Bodens bei Verdichtung
I. — statistische Untersuchung

Die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen dem organischen Stoff und den kennzeichnenden Punkten einer Proctorverdichtungskurbe wird statistisch aufein Hundert natürlicher Stoffe unternommen.

Der organische Stoff induziert :

— eine Zunahme des Wassergehalts an der hydrischen Grenze der Verdichtungsempfindlichkeit oder Plastizitätsgrenze,
— eine Minderung der Dichte und eine Erhöhung des Wassergehaltes bei maximaler Dichtigkeit.

Die Folge dieser Ergebnisse ist eine Erhöhung der Plastizitätszahl wie dieselbe, durch den Proctortest, von uns definiert wird.

Die vorgeschlagenen linearen Zusammenhänge beruhen auf der Annahme der Summierungsmöglichkeit zwischen dem organischen Stoff und der Tonphase, es kann jedoch kein besonderer Mechanismus vorgebracht werden, da der gesamte, veränderlische organische Stoff die Verschiedenheit der eingreifsfähigen organischen Bestandteile verschleiert. Als nächster Schritt sollen Veränderungen des mechanischen Verhaltens eines Materials hervorgerufen werden, um die Rollen der an die Tonphase gebundenen organischen Stoffe von denjenigen der freien organischen Stoffe zu dissozieren.

РЕЗЮМЕ

Влияние органического вещества на поведение почв при уплотнении.

I. Статистическое изучеиие.

ГЕРИФ Ж, ФОР А.

Изучение соотношений между органическим веществом и характерными пунктами кривой уплотнения Проктор, проводилось при помоши статистического метода на сотне образцов разных природных материалов.

Органинеское вещество индуцирует :

— увеличение содержания воды при достижении гидрических порогов чувствительности к уплотнению, иначе говоря — ограничивает пластичность.

— уменьшение плотности и увеличение содержания воды при максимальной уплотненности.

Эти рехультаты приводят к увеличению показателя пластичности, определяющегося при помощи теста Проктора.

Предлагаемые линейные соотношения предполагают гипотезу аддитивности между органическим веществом и глинистой фазой, но без возможности указания какого-бы то ни было особенного механизма, ибо переменная суммы органического вещества маскирует разнообразие органических веществ способных принимать в этом участие. В следуюшем этапе будут вызываться изменения механического поведения материала для диссоциадии роли органического вещества связанного с глинистой фазой, и свободных органических веществ.

Références bibliographiques

CHASSIN P., 1975. *Etude des interactions Montmorillonite calcique-Eau-Diols : Hydratation des complexes Montmorillonite-Diols*. Thèse université Paris VI.

FAURE A., 1971. Contribution à l'étude du mécanisme du compactage de sols (notion de potentiel de lubrification). *Ann. agron.*, **22,** 487-573.

FAURE A., 1978. *Comportement des sols au compactage : Rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains*. Thèse Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

FREE G. R., LAMB J. Jr., CERLETON E. C., 1947. Compactibility of certain soils as related to organic matter and erosion. *J. Amer. Soc. Agron.*, **39,** 1068-1076.

HOWARD M. TAYLOR, DELBERT W. HENDERSON, 1959. Some effects of organic additives on compressibility of yolo silt loam soil. *Soil Sci.*, **88,** 101-106.

MANIÈRE G., 1973. *Contribution à l'étude des zones compactées des horizons superficiels d'un sol complanté de vignes et desherbé chimiquement. Utilisation de la méthode Proctor*. Thèse université des Sciences et Techniques du Languedoc.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols*. Thèse Fac. des Sciences, Paris.

MONNIER G., GUÉRIF J. Amendements organiques en sol de serre. Conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques (à paraître).

RÉMY J. C., 1971. Influence de la constitution physique des sols sur le comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. *Ann. agron.*, **22,** 267-290.

SOANE B. D., CAMPBELL D. J., HERKES S. M., 1972. The characterisation of some Scottish arable top soils by agricultural engineering methods. *J. Soil Sci.*, 23-93.

STENGEL P., 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. agron.*, **30,** 27-51.

TAYLOR H. M., HENDERSON D. W., 1959. Some effects of organic additives on compressibility of yolo silt loam soil. *Soil Sci.*, **88,** 101-106.

TIETJEN C., SAUERLANDT W., 1974. Relation between humus content and volume weight of field soils after the application of stable manure, compost and straw. *Landwirtsch. Forsh. Supp.*, **30,** part. 2, 131-136.

Ann. agron., 1979, **30** (5), 401-414.

La volatilisation de l'ammoniac

II. — Influence des facteurs climatiques et du couvert végétal

Geneviève FAURIE et R. BARDIN

Laboratoire de Biologie des Sols,
Université Lyon-I
43, *Boulevard du* 11 *Novembre* 1918, 69622 *Villeurbanne Cedex*

Résumé

La volatilisation de l'ammoniac, comme la dénitrification représente pour le sol une perte d'azote sous forme gazeuse.

Ce processus dépend de la nature du sol et des composés azotés apportés.

Les facteurs d'ordre climatique comme l'humidité du sol et de l'air et la température déterminent les possibilités de dissolution et de diffusion de l'ammoniac.

La volatilisation réduite en sol sec, augmente aux faibles humidités puis décroît lorsque la teneur en eau est proche de l'humidité équivalente.

Par leur action sur l'activité microbienne, l'élévation de la température (entre 10 et 40 °C) et les alternances de dessiccation et d'humectation augmentent les risques de pertes.

Dans l'atmosphère les teneurs en NH_3 peuvent varier de l'état de traces à 190 $\mu g\ N.m^{-3}$ et sont fonction de la turbulence de l'air.

Cet ammoniac peut être adsorbé par le sol ou repris par la végétation au niveau foliaire, ce qui explique les transferts d'azote entre écosystèmes.

Ce mode d'alimentation azotée dépend de la concentration en NH_3 de l'air et du type de plante mais l'aspect quantitatif de l'absorption mérite d'être précisé eu égard à la part de ce phénomène dans les bilans azotés.

Introduction

L'apport au sol de composés azotés conduit dans certaines conditions à un dégagement d'ammoniac dans l'atmosphère.

Ce processus, analysé essentiellement au laboratoire, l'a été plus récemment sur le terrain avec la mise au point des techniques micrométéorologiques (Denmead *et al.*, 1976).

La volatilisation est particulièrement importante dans les sols de pH élevé et de faible capacité d'échange et dépend de la nature des composés azotés apportés. Ces phénomènes ont été discutés dans un précédent travail (Faurie et Bardin, 1979).

Dans cette seconde partie, nous examinerons l'effet des facteurs de l'environnement : humidité et température qui déterminent la dissolution et la diffusion de l'ammoniac et modulent l'activité microbienne.

L'ammoniac ainsi dégagé dans l'atmosphère peut être en partie repris par le sol, l'eau ou la végétation par absorption foliaire, ce mode d'alimentation azotée n'étant pas dénué d'intérêt.

Influence des facteurs climatiques et du couvert végétal

I. — *Humidité*

Sous le terme d'humidité sont regroupés les résultats concernant les effets de l'état hydrique des sols et du degré hygrométrique de l'air. L'humidité du sol intervient d'ailleurs plus par ses variations que par sa valeur propre. On distingue ainsi, l'influence de l'hydratation, de la dessiccation et des alternances de sécheresse et d'humectation. Ces phénomènes ont une action marquée sur l'activité microbienne et, à ce sujet, on note une prédominance des études réalisées à des teneurs en eau proches de l'humidité équivalente, valeur considérée comme optimale pour le développement de la microflore.

1. *Résultats.*

En sol sec, la volatilisation croît avec l'humidité relative de l'air (Hargrove *et al.*, 1977), et l'addition d'eau à un sol fertilisé par $(NH_4)_2SO_4$ provoque une volatilisation immédiate qui diminue dès que la quantité ajoutée atteint 50 à 80 p. 100 de l'humidité équivalente (Wahhab *et al.*, 1957 ; Mc Dowell et Smith, 1958 ; Fenn et Escarzaga, 1976 ; Prasad, 1976, tabl. 1).

TABLEAU 1

Effet de la température et de l'humidité sur la volatilisation en sol calcaire enrichi en urée (*N-* : 1 000 *ppm*) (incubation 21 jours sans variation sensible d'humidité)

Volatilization loss of ammonia from urea (*N-* : 1 000 *ppm*) *applied to calcareous soil as affected by moisture and temperature* (incubation for 21 days without significant loss of moisture) (Prasad, 1976)

Humidité	25 p. 100 H. E.		50 p. 100 H. E.		75 p. 100 H. E.	
Température	22 °C	32 °C	22 °C	32 °C	22 °C	32 °C
$N\text{-}NH_3$ p. 100	11,1	20,6	7,7	14,5	4,2	8,4

Globalement, on constate que le dégagement est nul ou presque lorsque le sol est sec (Volk, 1959 ; Fenn et Escarzaga, 1977), qu'il augmente pour une humidité proche du point de flétrissement et diminue pour une teneur en eau voisine de l'humidité équivalente (Hooker *et al.*, 1973).

Les études de terrain semblent prouver qu'une pluie succédant à une fertilisation ammoniacale est un facteur de réduction des pertes (Volk, 1970 ; Morrison et Foster, 1977), et Meyer *et al.* (1961) préconisent l'enfouissement si la pluie ne suit pas l'épandage.

Au laboratoire, en expérience d'incubation, la dessiccation du sol est réalisée par passage d'air de degré hygrométrique et de débit variables.

Pour un taux d'humidité de l'air de 100 p. 100, la dessiccation est nulle et le départ d'ammoniac limité. Entre 80 et 50 p. 100, l'évaporation est continue et la quantité d'azote volatilisé à partir d'urée atteint 20 p. 100 de l'apport ; si l'air est sec, la perte d'eau est rapide et la volatilisation cesse (Ernst et Massey, 1960). A ce stade, la mise en solution de l'ammonium n'est plus possible et l'activité uréasique est stoppée.

Dans l'épandage des fumiers ou boues résiduaires d'épuration, la dessiccation joue un rôle primordial. Le séchage à l'air de tels composés peut diminuer de moitié leur teneur en azote total (Giddens et Rao, 1975) en relation avec la perte d'azote ammoniacal qui peut atteindre 99 p. 100 (Stewart, 1970 ; Lauer *et al.*, 1976).

Des relations entre départ d'eau et d'ammoniac ont été recherchées. Jewitt (1942) signale que pour un sol saturé en eau et ayant reçu du sulfate d'ammonium, la volatilisation double pour une perte d'eau de 50 à 25 p. 100, mais le départ des 25 p. 100 restants ne provoque pas une aussi forte volatilisation. Pour Wahhab *et al.* (1957), il y a proportionnalité entre la quantité d'eau évaporée et l'ammoniac dégagé dans les premières heures, puis la volatilisation diminue (Chao et Kroontje, 1964). Cette relation est également observée par Watkins *et al.* (1972) et Kissel *et al.* (1977), dans une gamme de débit d'air de 0 à 15 $l.min^{-1}$; cette dernière valeur correspondant à un vent de 0,26 $km.h^{-1}$. Au-delà, l'accroissement de la volatilisation est négligeable.

Les phénomènes d'alternances d'humectation et de dessiccation prennent toute leur importance au niveau du champ (Simpson, 1968 ; Cornforth et Chesney, 1971 ; Lauer *et al.*, 1976 ; Hargrove *et al.*, 1977). Ils peuvent être simulés au laboratoire lorsque le maintien de l'humidité dans un système est assuré par un réajustement journalier.

Ainsi, dans des expériences d'incubation de sol sableux et calcaire où la teneur en eau est amenée chaque jour de 60 à 80 p. 100 de l'humidité équivalente, Faurie *et al.* (1975) observent un dégagement de 67 p. 100 à partir d'urée au bout de 8 jours. Si le

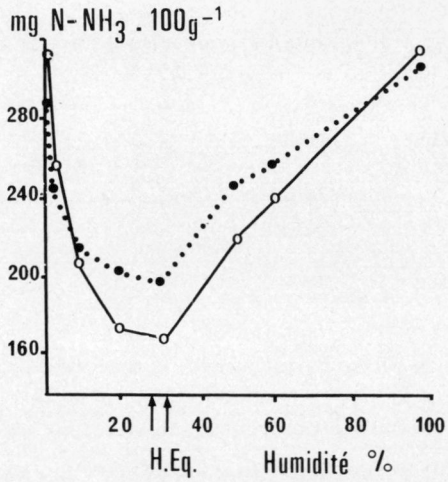


FIG. 1. — *Influence de l'humidité sur la rétention d'ammoniac par différents sols.*
Influence of moisture content on ammonia retention capacity of soils (Shimpi *et Savant*, 1976).

même sol est maintenu constamment à 80 p. 100 de l'humidité équivalente par balayage d'air humide, la volatilisation n'est que de 10 p. 100 après 5 semaines (ces deux valeurs ayant été enregistrées au même stade d'évolution de l'hydrolyse de l'urée).

2. *Discussion.*

La rétention de NH_3 est forte en sol sec, diminue puis augmente aux fortes humidités (Shimpi et Savant, 1975) (fig. 1). La volatilisation qui en découle suit une évolution similaire.

En sol humide, la rétention est due à la dissolution de l'ammoniac dans la solution du sol. Ce phénomène peut favoriser la diffusion et l'action du processus d'échange sur les colloïdes et aboutit à la diminution des teneurs en NH_3.

A ce propos, il faut rappeler que des concentrations locales trop élevées en NH_3 sont toxiques pour la microflore, en particulier pour les germes nitrifiants comme *Nitrobacter* (Court *et al.*, 1962 ; Faurie, 1972 ; Ashworth et Flint, 1974 ; Khengre et Savant, 1977). L'accumulation de nitrite qui en résulte essentiellement en sols calcaires peut être préjudiciable pour les végétaux (Paul et Polle, 1965).

La volatilisation en début d'humectation d'un sol initialement sec s'explique par :

— la dissolution puis l'hydrolyse du composé azoté : tel est le cas de l'urée,

— la réaction des sels d'ammonium avec le carbonate dont dépend la solubilité du produit formé (Fenn et Kissel, 1973),

— le déplacement de l'ammoniac adsorbé du fait de l'existence aux faibles humidités d'une compétition entre molécules d'eau et d'ammoniac au niveau des sites d'adsorption (Brown et Bartholomew, 1963 ; James et Harward, 1964 ; Young et Mc Neal, 1964), phénomène cependant discuté par Ashworth (1978),

— la reprise d'activité des micro-organismes qui dégradent les composés organiques.

En cours de dessiccation, le dégagement simultané de H_2O et NH_3 sera fonction de leur pression partielle dans le milieu (Wahhab *et al.*, 1957). L'arrêt de la volatilisation lorsque le sol est asséché indique que les molécules d'ammoniac sont plus énergiquement retenues que l'eau (Chao et Kroontje, 1964). Eliminant l'effet de la C.E.C., Fenn et Escarzaga (1977) enregistrent une relation linéaire entre dégagement de NH_3 et H_2O à partir d'un sable.

Les pertes importantes observées au cours d'alternances d'humectation et de dessiccation et plus particulièrement lors des variations quotidiennes d'humidité peuvent se comprendre par :

— le phénomène de dessiccation qui favorise le départ de NH_3,

— le passage journalier de 80 à 60 p. 100 de l'humidité équivalente qui correspond au niveau maximal de volatilisation,

— les alternances de phase de sécheresse et d'humectation qui activent les processus d'ammonification ou peuvent, en augmentant les propriétés catalytiques de certaines substances organiques adsorbées, faciliter leur décomposition.

C'est pourquoi il est parfois possible d'enregistrer des volatilisations plus fortes en sols acides soumis à des fluctuations de teneur en eau qu'en sols calcaires maintenus à humidité constante.

II. — *Température*

Fenn et Kissel (1974) indiquent d'une part que la température n'intervient pas sur la décomposition de $(NH_4)_2CO_3$ dont on suppose l'existence en sol carbonaté et d'autre part que son effet entre 12 et 32 °C est fonction de la quantité de $(NH_4)_2SO_4$ ajouté et ne se manifeste qu'à partir de 110 kg $N.ha^{-1}$. Le pourcentage d'azote volatilisé à partir d'urée double entre 22 et 32 °C (Prasad, 1976) (tabl. 1) alors qu'il n'augmente que du tiers entre 10 et 25 °C (Adriano *et al.*, 1974). Beauchamp *et al.* (1978) soulignent que lors d'épandage de boues la température des premiers jours conditionne le dégagement.

L'urée plus que les autres formes a été étudiée. Son hydrolyse chimique est très limitée aux températures ordinaires (Chin et Kroontje, 1963). L'effet de la température est par contre très marqué sur l'activité microbienne et Overrein et Moe (1967) notent une nette baisse de l'activité uréasique entre 28 et 4 °C. Ernst et Massey (1960) enregistrent une augmentation de 5 à 25 p. 100 du dégagement entre 7 et 32 °C. Volk (1959) constate des variations du même ordre alors que Watkins *et al.* (1972) observent une augmentation plus nuancée.

Selon Wagner et Smith (1958) et Meyer *et al.* (1961), la volatilisation peut apparaître à basse température du fait de l'inhibition de la nitrification. Mais Mahendrappa et Odgen (1973) notent l'existence d'une volatilisation dans des sols froids soumis à des températures élevées : les nitrifiants adaptés dans ce cas à certaines conditions de psychrophilie étant alors inhibés.

Il est possible de conclure que, très généralement, le dégagement d'ammoniac croît avec la température, entre 10 et 40 °C ; Van Veen (1977) estime une augmentation de 9 à 41 p. 100 : l'origine en est évidemment l'activation de la microflore productrice d'ammonium. Son devenir dépend alors soit de son prélèvement par la végétation, soit de sa transformation par les nitrifiants. Leur absence ou leur inactivité à basse température permet d'expliquer des volatilisations sur une longue période.

Pour des températures de 40 °C et plus, la stabilité thermique de certains acides aminés est réduite en particulier lorsque ces acides sont associés à la fraction colloïdale du sol (Juste et Dureau, 1967). Leur décomposition au cours de périodes chaudes ou lors d'un brûlis entraîne l'élévation du taux d'ammonium sans qu'intervienne obligatoirement un processus de minéralisation biologique des matières azotées.

III. — *Couvert végétal*

L'influence de la végétation sur la volatilisation de l'ammoniac a fait l'objet d'observations tant en serre que sur le terrain.

Kresge et Satchell (1960) remarquent que la présence de *Cynodon dactylon* (Bermuda grass) fait passer la volatilisation d'ammoniac à partir d'urée de 23 p. 100 en sol nu à 7 p. 100. Mills *et al.* (1974) donnent des résultats voisins pour du maïs cultivé avec NH_4Cl en serre et Cornforth et Chesney (1971) notent des chiffres équivalents pour des prairies d'*Axonopus compressus* (Herbe des savanes) fertilisées avec $(NH_4)_2SO_4$.

Par contre, Simpson (1968) signale une perte d'ammoniac originaire de l'urée supérieure en présence de végétation que lorsque celle-ci est retirée sur les premiers centimètres de sol. Enfin, dans des prairies mixtes de ray-grass (*Lolium rigidum*) et de

trèfle (*Trifolium subterraneum*), Denmead *et al.* (1976) enregistrent une volatilisation de 2 g $N.ha^{-1}.h^{-1}$, mais au cours de la pâture, elle atteint 13 g $N.ha^{-1}.h^{-1}$, soit près de 100 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$.

Cet ensemble de résultats dont certains semblent contradictoires peuvent s'expliquer à partir des remarques suivantes :

— En présence de végétation, les alternances de sécheresse et d'humidité sont atténuées en nombre et intensité par rapport au sol nu ce qui contribue à diminuer la volatilisation (Kresge et Satchell, 1960 ; Cornforth et Chesney, 1971).

— L'ammonium ajouté ou formé dans le sol peut être prélevé par les racines : la conséquence directe en est une réduction de la quantité d'ammoniac susceptible de se dégager. Puisque 70 p. 100 environ de la volatilisation a lieu dans les jours qui suivent l'application du composé azoté, il paraît indispensable, pour prévenir les pertes, d'étudier les périodes et techniques de fertilisation (Fenn et Escarzaga, 1976) pour obtenir une absorption rapide (Mills *et al.*, 1974). Il importe en particulier d'éviter des concentrations trop élevées en ammonium, toxiques pour la végétation ou pour la microflore, qui accroissent le pH et peuvent favoriser le dégagement.

— Sous végétation, la rhizosphère va jouer un rôle capital : les micro-organismes utilisent l'ammonium pour leurs propres synthèses et peuvent contribuer à la diminution du pH limitant ainsi le dégagement, mais la situation inverse peut également exister. En effet, dans certains sols riches en matière organique tels que des prairies (Simpson, 1968) ou des couverts forestiers (Volk, 1970 ; Watkins *et al.*, 1972 ; Morrison et Foster, 1977), l'activité uréasique est telle qu'après un ajout d'urée, la volatilisation sera plus importante qu'en sol nu.

— La concentration en NH_3 de l'air au-dessus du sol couvert de végétation est inférieure à celle notée lorsque la prairie est pâturée. Si l'absorption de NH_3 au niveau foliaire est à prendre en considération (Denmead *et al.*, 1976), le supplément d'azote dégagé dans le cas des pâtures a pour origine essentielle les déjections animales qui sont estimées à 1 kg $N.ha^{-1}.j^{-1}$ (Denmead *et al.*, 1974). Mais le dégagement à partir d'un tel apport varie de 30 p. 100 (Denmead *et al.*, 1974) à 90 p. 100 (Hutchinson et Viets, 1969 ; Lauer *et al.* 1974).

Devenir de l'ammoniac volatilisé

Le devenir de l'ammoniac est analysé ici en termes de transferts entre l'atmosphère, le sol, les eaux et la végétation. Des méthodes particulières ont ainsi été mises en œuvre pour estimer le flux d'ammoniac dans l'atmosphère et la reprise par les végétaux.

I. — *Méthodes d'étude*

1. *Flux d'ammoniac dans l'atmosphère.*

Les turbulences de l'atmosphère créent un gradient de concentration du gaz NH_3 dans l'air au-dessus du sol. La valeur de ce gradient est fonction de l'intensité de la source d'azote et de l'étendue de diffusion du mélange dans l'atmosphère.

La densité du flux vertical d'ammoniac exprimé en $\mu g\ N.m^{-2}.s^{-1}$, répond à l'équation (Denmead *et al.*, 1976, 1977)

$$F = -K \frac{dc}{dz}$$

où c = concentration en NH_3 en $\mu g\ N.m^{-3}$,
z = hauteur au sol en m,
K = coefficient de turbulence de l'air.

La teneur en NH_3 à un niveau z est obtenue par la méthode des capteurs acides. La turbulence de l'air dépend des conditions climatiques et son estimation nécessite l'enregistrement de nombreux facteurs micrométéorologiques : température et humidité de l'air, rayonnement net, densité de flux de chaleur dans le sol...

Cette méthode ne perturbe pas la végétation qui reste en conditions microclimatiques naturelles. Elle effectue une moyenne du flux d'ammoniac sur une surface importante de l'ordre de l'hectare, ce qui représente néanmoins une limitation. Elle permet d'évaluer les variations verticales du flux d'ammoniac, et donc, l'absorption de NH_3 par la végétation, mais la précision à ce niveau risque de ne pas être satisfaisante.

2. *Absorption foliaire de l'ammoniac.*

L'évaluation du phénomène a été tenté par des méthodes en conditions contrôlées.

Hutchinson *et al.* (1972) et Mahendrappa et Odgen (1973) placent tout ou partie de la plante dans une atmosphère contenant de l'ammoniac à une teneur compatible avec la vie végétale (Blanchar, 1967 ; Hunter et Rosenau, 1967). Après 24 h d'exposition, l'ammoniac est dosé dans l'atmosphère de l'enceinte et la consommation de la plante déduite par différence.

Une méthode directe consiste à faire appel à de l'ammoniac enrichi en ^{15}N et à rechercher dans les différentes parties de la plante la présence d'un marquage (Porter *et al.*, 1972).

II. — *Teneur en NH_3 de l'atmosphère*

Denmead *et al.* (1974) signalent au-dessus de surfaces pâturées par des ovins des teneurs de 3,4 à 51,5 $\mu g\ N.m^{-3}$ à 20 cm du sol et de 1,6 à 28,4 $\mu g\ N.m^{-3}$ à 95 cm.

La volatilisation contribue donc à augmenter localement mais aussi temporairement la concentration en NH_3 de l'atmosphère. C'est ainsi que l'on constate des variations saisonnières de 0,1 à 115 $\mu g\ N.m^{-3}$ (Malo et Purvis, 1964) ou nyctémérales ; ces dernières pouvant être le fait d'inversion de température (Luebs *et al.*, 1974).

Les différences sont également fonction de la distance de la zone de pollution agricole ou industrielle. La valeur correspondant à un dégagement de 148 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$ au-dessus de zones d'élevage n'est que de 16 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$, 800 m plus loin (Elliott *et al.*, 1971). Le champ d'action de cet ammoniac sur l'environnement dépend des vents dominants (Hutchinson et Viets, 1969 ; Luebs *et al.*, 1974) et permet d'apprécier dans certains cas l'effet de parcelles fertilisées sur les parcelles voisines témoins (Mahendrappa et Ogden, 1973).

III. — *Retour au sol ou entraînement par les eaux*

Pour des teneurs de l'atmosphère comprises entre 20 et 60 $\mu g\ N.m^{-3}$, Malo et Purvis (1964) estiment que l'adsorption par le sol se situe entre 22 et 78 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$

et expliquent ainsi certains rendements agricoles supérieurs observés en zone de volatilisation importante. Hanawalt (1969) donne des valeurs très similaires de 55 à 74 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$.

L'adsorption est fonction de la capacité d'échange du sol, mais à ce niveau, elle l'est également des facteurs de l'environnement. Elle augmente avec la concentration en NH_3 de l'air (Hanawalt, 1969).

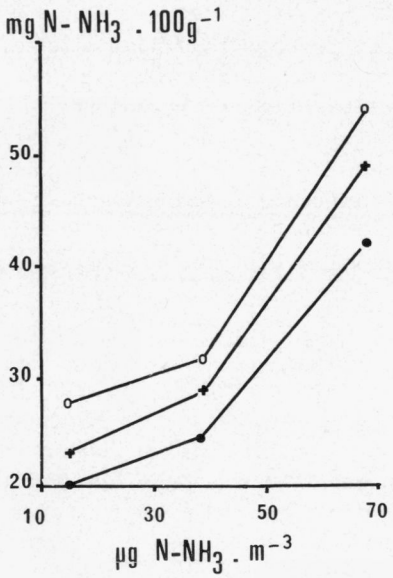


FIG. 2. — *Influence de la concentration en ammoniac de l'atmosphère sur l'adsorption de NH_3 par différents sols.*

Effect of atmospheric ammonia concentration on sorption of ammonia by various soil types (Hanawalt, 1969).

Du fait de sa solubilité, l'ammoniac peut être récupéré par les eaux légèrement acides. Si le retour au sol par les précipitations atteint 0,6 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$, la rétention par les lacs et cours d'eau varie de 7 à 73 kg $N.ha^{-1}.an^{-1}$ selon Hutchinson et Viets (1969) qui voient là une cause supplémentaire de l'eutrophisation.

IV. — *Absorption par la végétation*

De leurs données expérimentales dans les prairies mixtes de trèfle et ray-grass, Denmead *et al.* (1976) concluent que l'absorption d'ammoniac s'opère entre 10 et 20 cm, c'est-à-dire au niveau du trèfle (fig. 3). Dans des atmosphères enrichis en NH_3, le soja peut absorber 70 µg $N.100\ cm^{-2}.j^{-1}$ (Hutchinson *et al.*, 1972) et des aiguilles de sapin excisées prélèvent jusqu'à 16 mg $N.g^{-1}.5\ j^{-1}$ indépendamment de l'âge (Mahendrappa et Odgen, 1973).

L'absorption est en fait fonction de multiples facteurs parmi lesquels il faut retenir :

— la teneur du sol en azote minéral. La présence d'engrais accroît les quantités absorbées (Hutchinson *et al.*, 1972), mais il s'agit en réalité d'une action secondaire qui se traduit par une surface foliaire supérieure,

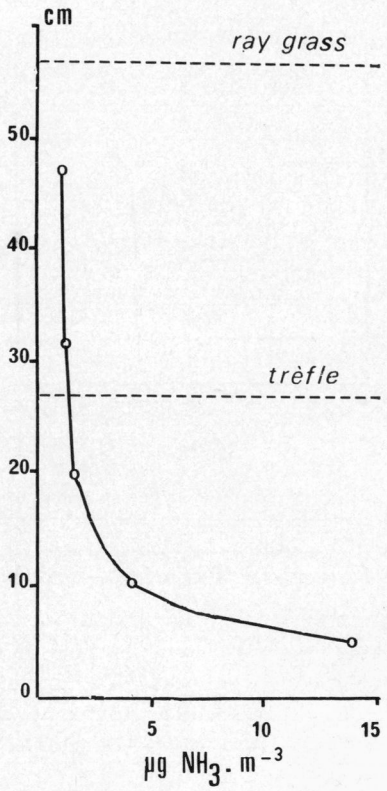


FIG. 3. — *Concentrations en ammoniac de l'atmosphère à différentes hauteurs dans une prairie mixte de trèfle et ray grass.*

Ammonia concentrations at various heights within a ray grass sub clover pasture (Denmead et al., 1976).

— la concentration en NH_3 de l'atmosphère. Entre 1 et 20 ppm, les quantités prélevées augmentent avec la teneur mais le coefficient d'utilisation diminue : de 43 p. 100 à 1 ppm, il passe à 30 p. 100 pour 20 ppm (Porter *et al.*, 1972),

— le type de plante. L'absorption par jour d'une surface foliaire de 100 cm^2 est respectivement de 104, 74, 65 et 50 µg N pour le maïs, diverses variétés de soja, le tournesol et le coton (Hutchinson *et al.*, 1972).

Qu'elle pousse ou non en présence d'engrais, qu'elle soit fixatrice d'azote ou pas, la plante semble conserver son aptitude à absorber NH_3 par voie foliaire. Comme le montrent Porter *et al.* (1972) à l'aide d'ammoniac marqué, cet azote est métabolisé puisque toutes les fractions azotées du végétal sont enrichies en ^{15}N, mais le mécanisme d'entrée est mal connu.

Hutchinson *et al.* (1972) enregistrent une corrélation entre l'absorption de CO_2 et de NH_3 (fig. 4) par des feuilles de soja au cours de fluctuations nyctémérales, et pensent que l'absorption dépend de l'ouverture des stomates bien qu'elle persiste à un taux moindre à l'obscurité. Denmead *et al.* (1976) estiment que la seule diffusion au niveau des stomates ne permet pas d'expliquer l'importance des quantités d'ammoniac prélevées dans l'atmosphère par le couvert végétal.

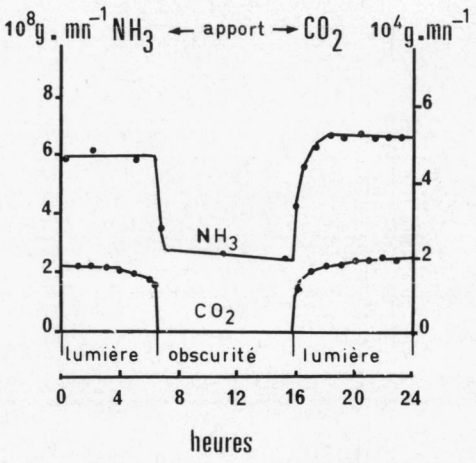


FIG. 4. — *Taux d'absorption de CO_2 et NH_3 par un soja (surface foliaire* : 89 cm²) *poussant sur sol enrichi en NH_4NO_3* (5 mg N-).

Uptake rates of CO_2 and NH_3 for soybean (leaf surface area : 89 cm²) *growing in soil containing* 5 mg N- *as NH_4NO_3* (*Hutchinson* et al., 1972)..

L'humidité matinale peut également jouer un rôle en dissolvant l'ammoniac au niveau des feuilles comme Wittwer et Teubner (1959) l'ont montré dans le cas de l'urée.

Quant à la différence entre espèces, elle peut se comprendre par l'existence d'une géométrie variable des feuilles suivant le type de plante (Hutchinson *et al.*, 1972).

Conclusion

Dans le cycle de l'azote, la volatilisation de l'ammoniac représente comme la dénitrification une perte pour le sol qu'il convient de ne pas négliger (Paul et Victoria, 1978). Dans certaines circonstances, ces deux processus peuvent être du même ordre de grandeur (Miller et Smith, 1977), mais à la différence de la dénitrification biologique, le dégagement d'ammoniac n'est pas sous la dépendance directe de la vie microbienne. Il est en relation avec la nature du sol (pH, calcaire, capacité d'échange), les apports d'azote (forme chimique, physique et quantité) et les facteurs de l'environnement.

L'action de la teneur en eau du sol est difficile à cerner. La raison majeure à cet état de fait est la diversité des phénomènes mettant en jeu l'humidité : réactions en phase liquide ou mixte, transferts en phase liquide ou gazeuse, optimum biologique de l'activité de la microflore tellurique... Ces mécanismes peuvent être tour à tour facteurs limitants et les tentatives de modélisation sont alors délicates.

La volatilisation est réduite en sol sec et à partir d'une teneur en eau proche de l'humidité équivalente. L'alternance de sécheresse et d'humidité est certainement le facteur primordial du fait de son impact sur les courants d'évaporation et sur l'activité microbienne.

L'action de la température varie suivant la complexité du système étudié. A pH et température élevés, la loi du Q_{10} semble assez bien respectée. Mais si des phénomènes

biologiques comme la nitrification ou l'immobilisation deviennent facteurs dominants, le sens des variations peut à la limite s'inverser.

Le rôle des variations de l'humidité relative de l'air, de la température et du régime des vents explique le développement actuel des études micro-météorologiques (Denmead *et al.*, 1977 ; Hargrove *et al.*, 1977 ; Beauchamp *et al.*, 1978).

Les teneurs en NH_3 de l'atmosphère au-dessus de zones d'élevage peuvent atteindre 190 $\mu g\ N.m^{-3}$, ce qui laisse estimer une volatilisation de l'ordre de 100 à 150 $kg\ N.ha^{-1}.an^{-1}$.

La possibilité de retour au sol fait que celui-ci peut être considéré comme source et « puits » de NH_3. Pour des teneurs de l'atmosphère de 60 $\mu g\ N.m^{-3}$, l'adsorption par le sol peut atteindre 70 $kg\ N.ha^{-1}.an^{-1}$ (Malo et Purvis, 1964 ; Hanawalt, 1969).

La comparaison de volatilisation sur parcelles nues ou couvertes de végétation, montre que, dans la majorité des cas, la présence d'une culture réduit les dégagements nets. La végétation intervient en limitant l'évaporation directe, en absorbant l'azote minéral mais également en prélevant l'ammoniac atmosphérique. Ce processus nutritionnel soulève le problème des transferts d'azote d'un écosystème à l'autre par la voie aérienne ; les seuls généralement pris en compte étant ceux qui s'établissent par les eaux chargées en nitrates. L'absorption par les plantes pouvant s'élever à 20 $kg\ N.ha^{-1}.an^{-1}$ (Hutchinson et Viets, 1969), des études complémentaires s'avèrent nécessaires pour préciser l'importance de ce phénomène dont les conséquences ne sont pas négligeables : amélioration du bilan d'azote au champ, qu'il s'agisse de plantes fixatrices ou non, nutrition azotée en serre...

Reçu pour publication en novembre 1979.

Summary

Volatilization of ammonia. II. — *Influence of climatic factors and plant cover*

As well as denitrification, volatilization of ammonia is an important loss of gaseous nitrogen from soil.

This process depends of the nature of soil and applied nitrogen compounds.

Such climatic factors as moisture of both soil and air, together with temperature, determine the dissolution and diffusion of ammonia.

Volatilization is reduced in dry soil, increases with low humidity content and decreases thereafter when water content approximates field capacity.

Owing to their action on microbial activity, rise of temperature (from 10 to 40 °C) and alternances of drying and moistening periods increase ammonia loss.

In the atmosphere, NH_3 contents may range from mere traces to 190 $\mu g\ N.m^{-3}$ and depend on the turbulence of the air.

This ammonia may be adsorbed by the soil or absorbed by plant leaves ; this accounts for tranfers between ecosystems.

This type of nitrogenous nutrition depends on the NH_3 air concentration and type of plant, but the quantitative aspect of the absorption needs complementary research to know the scope of this phenomenon in nitrogen balance.

Zusammenfassung

NH_3-*Verfluchtingungsverluste.* II. — *Einfluss der Klimafaktore und die Vegetation*

NH_3-Verflüchtingung sowie Denitrifizierung bildet für den Boden einen gasförmigen Stickstoffverlust.

Dieser Vorgang hängt von der Bodenbeschaffenheit sowie von den hinzugesetzten Stickstoffverbindungen ab.

Die klimatischen Einflüsse, wie zum Beispiel die Boden — und Luftfeuchtigkeit sowie die Temperatur bestimmen die Lösungs — und Diffusionsfähigkeiten des Ammoniaks.

Der redutzierte Verlust im trockenen Boden nimmt mit schwacher Feuchtigkeit zu, um wieder abzunehmen, wenn der Wassergehalt sich der Feldkapacität nähert.

Durch ihre Wirkung auf die Mikrobentätigkeit nehmen die Temperatur-erhöhung (zwischen 10 und 40 °C) und die Abwechslung von Feuchtigkeit und Austrocknen die Verlustgefahr.

In der Luft können die NH_3-Gehalte von Spuren bis zu 190 $\mu g\ N.m^{-3}$ schwanken und sind von der Luftbewegung abhängig.

Dieser Ammoniak wird vom Boden adsorbiert und durch die Pflanzenblätter absorbiert, was erklärt die Stickstoffsübertragung zwischen Ecosystemen.

Dieser Stickstoffversorgungsweise ist von der NH_3-konzentration in der Luft sowie der Pflanzenart abhängig. Quantitative Absorptionsstudien müssen ausgeführt werden, wenn man betrachtet auf die Beiteilung dieser Erscheinung an den Stickstoffbilanzen.

РЕЗЮМЕ

Улетучивание аммониака.

II. — Влияние климатических факторов и растительного покрова.

ФОРИЕ ЖЕНЕВЬЕВА, БАРДЕН Р.

Для почвы, улетучивание аммониака, также как и денитрификация, представляет потерю азота в газовидной форме.

Процесс этот зависит от природы почвы и внесенных азотных соединений. Такие климатические факторы как влажность почвы, воздуха, и температуры, определяют возможности растворения и диффузии аммониака.

Слабое в сухих почвах, улетучивание аммониака увеличивается при небольших влажностях и уменьшается затем, когда содержание воды в почве приближается к равновесной влажности.

Ввиду их действия на аммонифицирующую активность микробов, увеличение температуры (С 10° до 40°) и чередование высыханий и увлажнений, увеличивают риск потерь.

Содержание NH_3 в атмосфере может изменяться от просто следов, до 190 $\mu г\ N_m^{-3}$ и зависит от турбулентности воздуха.

Этот аммониак может адсорбироваться почвой, или снова поглощаться растениями на уровне листьев, что и об'ясняет перемещения азота из одной эко-системы в другую.

Этот способ азотного питания зависит прежде всего от концентрации NH_3 в воздухе и от типа растения, но количественный аспект поглощения заслуживает уточнения, ввиду участия этого явления в балансах азота.

Références bibliographiques

ADRIANO D. C., CHANG A. C., SHARPLESS R., 1974. Nitrogen loss from manure as influenced by moisture and temperature. *J. Environ. Qual.*, **3,** 258-261.

ASHWORTH J., 1978. Reactions of ammonia with soil. II. Sorption of NH_3 on english soils and on Wyoming bentonite. *J. Soil Sci.*, **29,** 195-206.

ASHWORTH J., FLINT R. C., 1974. Delayed nitrification and controlled recovery of aqueous ammonia injected under grass. *J. agric. Sci., Camb.*, **83,** 327-333.

BEAUCHAMP E. G., KIDD G. E., THURTELL G., 1978. Ammonia volatilization from sewage sludge applied in the field. *J. Environ. Qual.*, **7,** 141-146.

BLANCHAR R. W., 1967. Determination of the partial pressure of ammonia in soil air. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31,** 791-795.

BROWN J. M., BARTHOLOMEW W. V., 1963. Sorption of gaseous ammonia by clay minerals as influenced by sorbed aqueous vapor and exchangeable cations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27,** 160-164.

CHAO T. T., KROONTJE W., 1964. Relationships between ammonia volatilization, ammonia concentration and water evaporation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 393-395.

CHIN T., KROONTJE W., 1963. Urea hydrolysis and subsequent loss of ammonia. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27,** 316-318.

CORNFORTH I. S., CHESNEY H. A. D., 1971. Nitrification inhibitors and ammonia volatilization. *Plant and Soil*, **34,** 497-501.

COURT M. N., STEPHEN R. C., WAID J. S., 1962. Nitrite toxicity arising from the use of urea as a fertilizer. *Nature*, **194,** 1263-1265.

DENMEAD O. T., SIMPSON J. R., FRENEY J. R., 1974. Ammonia flux into the atmosphere from a grazed pasture. *Science*, **185,** 609-610.

DENMEAD O. T., FRENEY J. R., SIMPSON J. R., 1976. A closed ammonia cycle within a plant canopy. *Soil Biol. Biochem.*, **8,** 161-164.

DENMEAD O. T., SIMPSON J. R., FRENEY J. R., 1977. A direct field measurement of ammonia emission after injection of anhydrous ammonia. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 1001-1004.

ELLIOTT L. F., SCHUMAN G. E., VIETS F. G. Jr., 1971. Volatilization of nitrogen-containing compounds from beef cattle areas. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35,** 752-755.

ERNST J. W., MASSEY H. F., 1960. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24,** 87-90.

FAURIE G., 1972. Effet de l'apport d'argile à un sol sablo-calcaire sur la cinétique de la nitrification. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **9,** 439-449.

FAURIE G., BARDIN R., 1979. La volatilisation de l'ammoniac : I. Influence de la nature du sol et des composés azotés. *Ann. agron.*, **30** (4), 363-385.

FAURIE G., JOSSERAND A., BARDIN R., 1975. Influence des colloïdes argileux sur la rétention d'ammonium et la nitrification. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **12,** 201-210.

FENN L. B., ESCARZAGA R., 1976. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. V. Soil water content and method of nitrogen application. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **40,** 537-541.

FENN L. B., ESCARZAGA R., 1977. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds to calcareous soils. VI. Effects of initial soil water content and quantity of applied water. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 358-363.

FENN L. B., KISSEL D. E., 1973. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. I. General theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37,** 855-859.

FENN L. B., KISSEL D. E., 1974. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. II. Effects of temperature and rate of ammonium nitrogen applications. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **38,** 606-610.

GIDDENS J., RAO A. M., 1975. Effect of incubation and contact with soil on microbial and nitrogen changes in poultry manure. *J. Environ. Qual.*, **4,** 275-278.

HANAWALT R. B., 1969. Environmental factors influencing the sorption of atmospheric ammonia by soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33,** 231-234.

HARGROVE W. L., KISSEL D. E., FENN L. B., 1977. Field measurements of ammonia volatilization from surface applications of ammonium salts to a calcareous soil. *Agron. J.*, **69,** 473-476.

HOOKER M. L., PETERSON G. A., SANDER D. H., 1973. Ammonia nitrogen losses from simulated plowing of native sods. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37,** 247-249.

HUNTER A. S., ROSENAU W. A., 1966. The effects of urea, biuret and ammonia on germination and early growth of corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30,** 77-81.

HUTCHINSON G. L., MILLINGTON R. J., PETERS D. B., 1972. Atmospheric ammonia : absorption by plant leaves. *Science*, **175,** 771-772.

HUTCHINSON G. L., VIETS F. G., 1969. Nitrogen enrichment of surface water by absorption of ammonia volatilized from cattle feedlots. *Science*, **166,** 514-515.

JAMES D. W., HARWARD M. E., 1964. Competition of NH_3 and H_2O for adsorption sites on clays minerals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 636-640.

JEWITT T. N., 1942. Loss of ammonia from ammonium sulfate applied to alkaline soils. *Soil Sci.*, **54,** 401-409.

JUSTE C., DUREAU P., 1967. Production d'azote ammoniacal par décomposition thermique d'acides aminés associés à un sol argilo-limoneux. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **265,** 1167-1169.

KHENGRE S. T., SAVANT N. K., 1977. Distribution pattern of inorganic nitrogen following anhydrous ammonia injection into a vertisol. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 1139-1141.

KISSEL D. E., BREWER H. L., ARKIN G. F., 1977. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 1133-1138.

KRESGE C. B., SATCHELL D. D., 1960. Gaseous loss of ammonia from nitrogen fertilizers applied to soils. *Agron. J.*, **52,** 104-107.

LAUER D. A., BOULDIN D. R., KLAUSNER S. D., 1976. Ammonia volatilization from dairy manure spread on the soil surface. *J. Environ. Qual.*, **5,** 134-141.

LUEBS R. E., DAVIS K. R., LAAG A. E., 1974. Diurnal fluctuation and movement of atmospheric ammonia and related gases from dairies. *J. Environ. Qual.*, **3,** 265-269.

McDOWELL L. L., SMITH G. E., 1958. The retention and reactions of anhydrous ammonia on different soil types. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22,** 38-42.

MAHENDRAPPA M. K., OGDEN E. D., 1973. Patterns of ammonia volatilization from a forest soil. *Plant and Soil*, **38,** 257-265.

MALO B. A., PURVIS E. R., 1964. Soil adsorption of atmospheric ammonia. *Soil Sci.*, **97,** 242-247.

MEYER R. D. A., OLSON R. A., RHODES H. F., 1961. Ammonia loss from fertilized Nebraska soil. *Agron. J.*, **31,** 380-382.

MILLER R. J., SMITH R. B., 1976. Nitrogen balance in the southern San Joaquin Valley. *J. Environ. Qual.*, **5,** 274-278.

MILLS H.A., BARKER A. V., MAYNARD D. N., 1974. Ammonia volatilization from soils. *Agron. J.*, **66,** 355-358.

MORRISON I. K., FOSTER N. W., 1977. Fate of urea fertilizer added to a boreal forest Pinus banksiana Lamb. Stand. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **41,** 441-448.

OVERREIN L. N., MOE P. G., 1967. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31,** 57-61.

PAUL J. L., POLLE E., 1965. Nitrite accumulation related to lettuce growth in slightly alkaline soil. *Soil Sci.*, **100,** 292-297.

PAUL E. A., VICTORIA R. L., 1978. Nitrogen transfers between the soil and atmosphere, in *Environmental biochemistry and geomicrobiology. 2. The terrestrial environment*, Krumbein W. E. ed., Ann Arbor Science, Mich.

PORTER L. K., VIETS F. G., HUTCHINSON G. L. Jr, 1972. Air containing nitrogen-15 ammonia : foliar absorption by corn seedlings. *Science*, **175,** 759-761.

PRASAD M., 1976. Gaseous loss of ammonia from sulfur-coated urea, ammonium sulfate and urea applied to calcareous soil (pH 7,3). *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **40,** 130-134.

SHIMPI S. S., SAVANT N. K., 1975. Ammonia retention in tropical soils as influenced by moisture content and continuous submergence. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39,** 153-154.

SIMPSON J. R., 1968. Losses of urea nitrogen from the surface of pasture soils. *Trans. Intern. Congr. Soil Sci.*, 9th Congr. Adelaïde, 2, 459-466.

STEWART B. A., 1970. Volatilization and nitrification of nitrogen from urine under simulated cattle feedlot conditions. *Environ. Sci. Techn.*, **4,** 579-582.

VAN VEEN J. A., 1977. *The behaviour of nitrogen in soil. A computer simulation model.* Thesis Wageningen, 164 p.

VOLK G. M., 1959. Volatile loss of ammonia following surface applications of urea to turfand bare soils. *Agron. J.*, **51,** 746-749.

VOLK G. M., 1970. Gaseous loss of ammonia from pilled urea applied to slash pine. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34,** 513-516.

WAGNER G. H., SMITH G. E., 1958. Nitrogen losses from soils fertilized with different nitrogen carriers. *Soil Sci.*, **85,** 125-129.

WAHHAB A., RANDHAWA M. S., ALAM S. Q., 1957. Loss of ammonia from ammonium sulfate under different conditions when applied to soils. *Soil Sci.*, **84,** 249-255.

WATKINS S. H., STRAND R. F., DEBELL D. S., ESCH J. Jr, 1972. Factors influencing ammonia losses from urea applied to northwestern forest soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36,** 354-357.

WITTWER S. H., TEUBNER F. G., 1959. Foliar absorption of mineral nutrients. *Ann. Rev. Pl. Physiol.*, **10,** 13-32.

YOUNG J. L., McNEAL B. R., 1964. Aspects of ammonia and ammonium reactions with layer-silicates minerals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 334-339.

WATSON G. A., CHIN T. T., WONG P. W., 1962. Loss of ammonia by volatilization from surface dressings of urea in Hevea cultivations. *J. Rubber Research Inst.* Malaya, **17,** 77-90.

WITTWER S. H., TEUBNER F. G., 1959. Foliar absorption of mineral nutrients. *Ann. Rev. Pl. Physiol.*, **10,** 13-32.

YOUNG J. L., McNEAL B. R., 1964. Aspects of ammonia and ammonium reactions with layer-silicates minerals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28,** 334-339.

Ann. agron., 1979, **30** (5), 415-430

Liaison statistique entre le développement et la croissance chez les plantes : application d'un modèle simplifié à l'analyse de la croissance

Ph. MALET

Station de Bioclimatologie
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

On montre d'abord que, chez les plantes, la distinction entre le développement et la croissance est seulement possible au niveau des organes ou parties d'organes dont on peut repérer précisément la date d'initiation. Pour une telle « entité élémentaire d'organogenèse », le développement comprend les phases d'initiation et de latence qui précèdent la croissance proprement dite.

Il existe alors une liaison « statistique » entre le développement et la croissance. On montre en effet que la variabilité de la croissance au sein d'une population dépend directement de la variabilité des instants où chaque entité élémentaire d'organogenèse termine la phase de développement. Cela conduit à un modèle général de croissance qui tient compte de la distribution des instants (t_i) où débute la croissance pour chaque plante.

On détermine alors les conditions particulières pour lesquelles la croissance $Y_i(t)$ atteinte à l'instant t par une entité élémentaire d'organogenèse i peut s'exprimer sous la forme simplifiée :

$$Y_i(t) = F(t - t_i) + e_i(t)$$

dans laquelle t_i représente le début de la phase de croissance considérée pour chaque plante et $e_i(t)$ l'erreur résiduelle. On montre que, dans ces conditions, les évolutions des variances et des coefficients de dissymétrie deviennent des outils d'analyse de la croissance très efficaces, en particulier pour repérer les périodes où un ou plusieurs facteurs *sont devenus* limitants.

I. — Introduction

Notre connaissance est très dépendante des outils dont on dispose pour percevoir le réel, et il est largement démontré que les modèles statistiques font partie des outils qui permettent une meilleure perception du réel.

Mais, en biologie, l'enregistrement des phénomènes de croissance (en particulier pour élaborer puis tester des modèles explicatifs) se fait encore presque exclusivement au moyen de l'outil statistique le plus rudimentaire : l'évolution dans le temps des *moyennes* des mesures. Pourtant plusieurs auteurs ont constaté qu'il existait des liaisons entre ces moyennes et certains autres paramètres statistiques : avec les variances

(Koyama et Kira, 1956 ; Malet, 1969 ; Buis, 1974), ou encore avec les coefficients de dissymétrie de Pearson (Simon et Delecolle, 1974 ; Ferret, 1975). On peut donc se demander si ces variances et ces coefficients de dissymétrie ne pourraient pas apporter une perception supplémentaire des phénomènes de croissance.

Koyama et Kira (1956) ont déjà montré que, pour les croissances exponentielles, l'hypothèse d'une distribution gaussienne des taux de croissance individuels expliquait très bien l'évolution des distributions des mesures et, plus particulièrement, l'augmentation concomitante des moyennes et des variances.

Cette interprétation, qui permet de détecter des différences de variabilité des taux de croissance entre des populations qui peuvent avoir des évolutions « moyennes » identiques, est incontestablement un nouvel outil d'analyse intéressant : par exemple pour des études éco-physiologiques ou encore pour opérer une sélection génétique.

Malheureusement, ce modèle n'interprète pas toutes les relations possibles entre les distributions des mesures et leur moyenne : par exemple les cas signalés par Malet (1969) et Buis (1974) où les variances diminuent lorsque les moyennes augmentent. Et surtout, il n'explique pas pourquoi les taux individuels de croissance peuvent avoir des variabilités différentes d'une population à une autre.

Nous allons montrer que la cause de ce phénomène est la liaison qui existe au niveau de chaque organe d'une plante entre le développement et la croissance. Ensuite, nous formaliserons cette liaison par un modèle statistique valable pour n'importe quel organe de n'importe quelle plante. Enfin, nous dégagerons les conditions qui simplifient notablement ce modèle général et qui permettent d'utiliser les variances et les dissymétries des distributions des mesures de croissance comme de véritables outils d'analyse des conditions de croissance.

Cette possibilité nouvelle sera illustrée par deux analyses comparatives de croissance : celle de deux entre-nœuds successifs de la tige d'un blé d'hiver, et celle des épis de deux variétés de maïs.

II. — Définition de la croissance et du développement

La croissance d'un être vivant recouvre à la fois les initiations successives des différents organes et leurs croissances. Il faut donc se placer au niveau de chaque organe pour séparer sans ambiguïté le développement de la croissance, et, à ce niveau, il vaut mieux substituer le terme d'*organogenèse*, à celui de développement.

Il arrive même parfois qu'un organe soit initié en plusieurs étapes et que le début de la croissance de chacun de ses primordiums reflète encore l'ordre chronologique de l'initiation cellulaire ; c'est le cas pour les entre-nœuds de la tige de blé (Vincent et Malet, 1977). Il faut donc, en fait, se placer au niveau des *entités élémentaires d'organogenèses* pour parfaitement séparer croissance et développement.

La vie elle-même de ces entités élémentaires d'organogenèse se subdivise en cinq phases :

1. l'initiation à partir des secteurs d'organogenèse dont la date dépend de la vitesse d'initiation des entités précédentes,

2. une latence dont la durée dépend de la vitesse d'initiation des entités suivantes et/ou de la vitesse de croissance des entités initiées précédemment,

3. la division cellulaire, plus ou moins rapide suivant que la latence de cette phase se prolonge ou non,

4. l'élongation cellulaire (avec ou sans début de fonctionnement),

5. le fonctionnement et/ou la sénescence.

Les phases (3) et (4) représentent *la croissance mesurable*. Il est donc parfaitement possible de distinguer sans ambiguïté le développement de la croissance pour des entités élémentaires d'organogenèse : *le développement* comprend les phases d'initiation et de latence, *la croissance*, les phases de division et l'élongation cellulaire.

Mais alors, le développement d'un être vivant ne peut plus se définir seulement comme la série des événements représentatifs de ses transformations structurelles. Il devient *une série de phases* dont certaines se chevauchent. De même la croissance d'un être vivant devient aussi une série de phases élémentaires de croissance dont certaines se chevauchent.

En tout cas, la distinction entre développement et croissance n'est repérable qu'au niveau de chaque entité élémentaire d'organogenèse. C'est donc à ce niveau seulement que nous pouvons élaborer un modèle statistique de croissance qui tienne compte des phénomènes de développement.

III. — Modèle statistique de croissance des entités élémentaires d'organogenèse

1. — *Principes*

Soit une population d'êtres vivants génétiquement identiques qui débutent tous leur ontogenèse au même instant. Malgré une situation de départ aussi homogène, il est inévitable que, par la suite, certains facteurs du milieu ne restent pas constamment à des niveaux identiques pour tous les individus. Aussi, les dates d'initiation, les

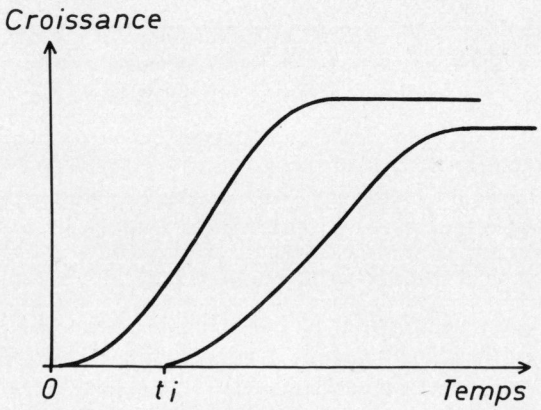


FIG. 1. — *Relation entre la croissance et le développement*. Cas général : Croissance (Y_i) d'une plante ayant un retard de développement (t_i) par rapport à la croissance moyenne (Y) de la population.

Relation between growth and development. General case (equation (3)) : Growth evolution (Y_i) of an elementary organogenesis entity with a later date (t_i) of development in comparizon with the population mean (Y). (Absc. = Time ; Ord. = Growth).

durées de développement et les vitesses de croissance des entités d'organogenèse vont devenir légèrement différentes d'un individu à un autre. En particulier, chaque individu débutera chaque phase élémentaire de croissance à un instant qui lui est propre.

Choisissons, pour chacune de ces phases de croissance, une origine commune des temps, par exemple la moyenne de tous les débuts de croissance, et repérons chaque individu par le décalage de temps t_i avec lequel il débute sa croissance (fig. 1). La distribution des écarts t_i est caractéristique du passage entre développement et croissance pour chaque entité d'organogenèse considérée.

Considérons maintenant le cas (fig. 2) correspondant aux hypothèses suivantes :

a) Malgré la variabilité de leur début de croissance, tous les individus suivent chacun à partir de leur origine propre ($t = t_i$) la même loi de croissance : une fonction G du temps t et de p paramètres β. Dans ces conditions la croissance $y_i(t)$ d'un individu s'écrit :

$$y_i(t) = G(\beta_p, t - t_i) . \qquad (1)$$

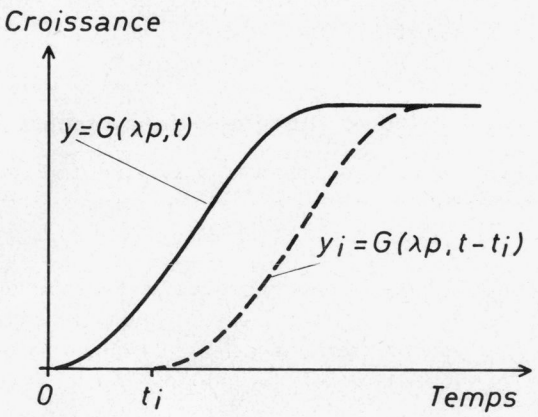


FIG. 2. — *Relation entre la croissance et le développement.* Modèle simplifié.
Relation between growth and development. Simplified model (equations (2), (4), (9)).
(Absc. = Time ; Ord. = Growth.)

b) Cependant cette loi de croissance individuelle est suivie à une fonction aléatoire près $e_i(t)$ qui, à tout instant t, conserve la même loi de probabilité (1) : une loi de Gauss de moyenne nulle et d'écart type σ : $N(0, \sigma)$. On a alors :

$$y_i(t) = G(\beta_p, t - t_i) + e_i(t) . \qquad (2)$$

Nous verrons que cette situation, qui paraît idéale, se rencontre pourtant en conditions expérimentales. Mais, bien entendu, c'est la situation représentée sur la figure 1 qui est la plus générale. Elle n'est pas beaucoup plus compliquée, car tous les individus d'une même espèce (même s'ils ne sont pas génétiquement semblables comme nous l'avons présupposé ici), ont leurs lois élémentaires de croissance programmées par un génome commun. On peut donc faire l'hypothèse que les lois de croissance des indivi-

(1) Une telle fonction aléatoire est qualifiée de « stationnaire ».

dus pour une entité élémentaire d'organogenèse donnée appartiennent toutes à la même famille de fonctions. Dans ces conditions, on peut se contenter de caractériser les lois individuelles de croissance par des variations individuelles des paramètres β_p : par exemple par des écarts b_{pi} autour de leur moyenne respective B_p :

$$y_i(t) = G(B_p - b_{pi}, t - t_i) + e_i(t) . \qquad (3)$$

Le choix de cette expression nous est dicté par le souci de maintenir invariable la distribution des écarts t_i pendant toute la phase de croissance considérée. En effet, de cette façon, la distribution des t_i continue, comme pour le modèle (2), à caractériser parfaitement les conditions de passage entre le développement et la croissance pour la phase considérée, mais uniquement ce passage.

En fait, ces considérations sur le modèle général ont pour seul but de ménager l'avenir, car, dans la suite de cet article, nous allons étudier exclusivement les situations correspondant au modèle (2).

2. — *Hypothèses supplémentaires*

A partir de maintenant, nous écrirons le modèle (2) sous la forme simplifiée :

$$y_i(t) = F(t - t_i) + e_i(t) . \qquad (4)$$

Et pour tirer de cette expression des conclusions intéressantes, nous ferons quatre hypothèses supplémentaires (en plus des hypothèses *a*) et *b*) du paragraphe précédent) :

c) La vitesse de croissance $F'_t = dF/dt$ est une fonction définie continue et dérivable par rapport au temps. Or il ne faut pas oublier que la fonction de croissance F est en réalité une fonction du temps par l'intermédiaire de l'évolution dans le temps des facteurs du milieu X_m qui agissent sur la croissance :

$$F(t - t_i) = F[X_m(t - t_i)] . \qquad (6)$$

Supposons pour simplifier le raisonnement qu'il n'y ait que deux facteurs actifs X_1 et X_2 :

$$F'_t = \frac{\partial F}{\partial X_1} \cdot \frac{\partial X_1}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial X_2} \cdot \frac{\partial X_2}{\partial t}$$

la vitesse de croissance F'_t est définie si et seulement :

(i) Si les dérivées partielles $\partial F/\partial X_1$ et $\partial F/\partial X_2$ existent toutes les deux, c'est-à-dire si les facteurs X_1 et X_2 se trouvent bien dans les intervalles de variation pour lesquels le programme génétique de croissance peut fonctionner. En dehors de ces intervalles, suivant la loi d'action bien connue des facteurs limitants, toutes les dérivées partielles cessent d'exister et le programme de croissance s'arrête. Or si l'individu ne meurt pas, on peut confondre ce bloquage avec le retour naturel à une vitesse de croissance nulle à la fin du programme de croissance.

Pourtant ce sont deux situations très différentes et il est très intéressant de pouvoir les distinguer ;

(ii) Et si les dérivées partielles $\partial X_1/\partial t$ et $\partial X_2/\partial t$ existent toutes les deux, ce qui est généralement le cas. La situation où l'une de ces dérivées partielles n'existe pas (par

exemple $\partial X_1/\partial t$), correspond à une variation discontinue du facteur X_1. Or, dans ce cas, il y a de grande chance de sortir de l'intervalle de variation où $\partial F/\partial X_1$ existe. En conséquence, il y a également un blocage de la croissance.

d) Nous supposerons que la distribution des écarts t_i suit une loi de probabilité unimodale, symétrique et de moyenne nulle. Par conséquent, si m_r sont les moments d'ordre r de cette distribution (m_2 représente alors sa variance) tous les moments d'ordre impair (m_3, m_5, etc...) sont nuls.

Nous verrons l'utilité de cette hypothèse, pour le développement du modèle. Mais elle est certainement la plus embarrassante car la plus difficile à vérifier expérimentalement. En effet, comment mesurer le moment exact où débute une croissance ? Généralement, on peut tout au plus établir l'évolution dans le temps des fréquences des individus qui dépassent le plus petit seuil mesurable de croissance. Cependant, on a

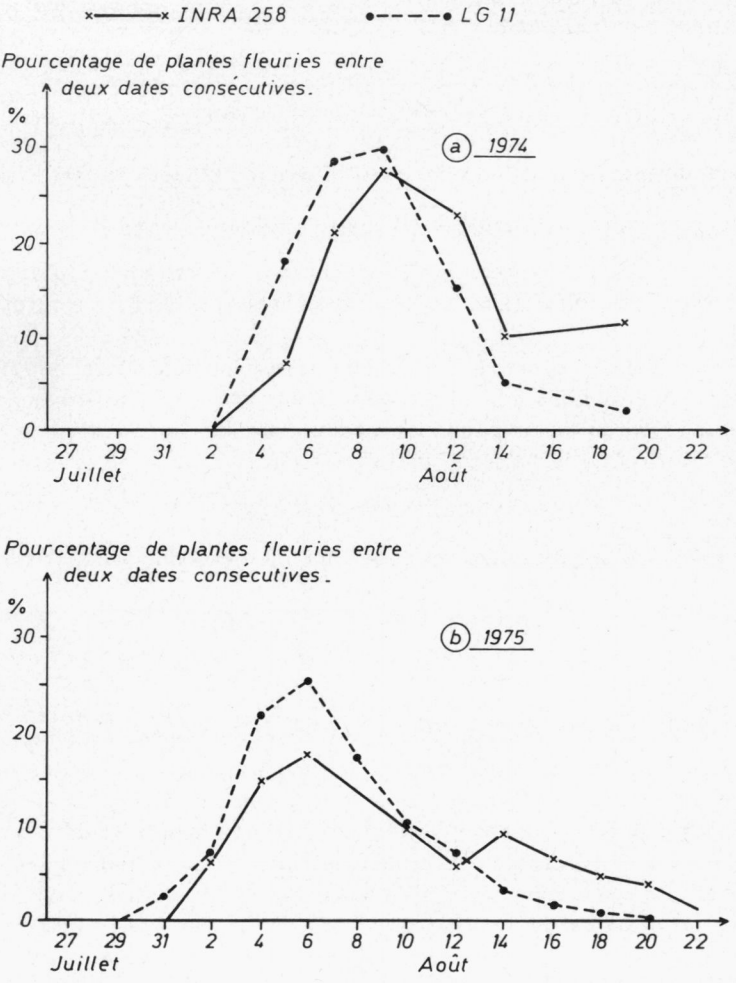


FIG. 3. — *Floraison femelle du maïs (d'après Cherouvrier, 1977).*

Silking of maize. (Absc. = Time ; Ord. = Percent of silking ears appeared between two consecutive dates.)

parfois la chance que le début de la croissance d'un organe fasse immédiatement suite à un événement repérable. Par exemple, dans une certaine mesure au moins, l'étalement dans le temps de la maturité des stigmates peut représenter l'étalement ultérieur de la fécondation. Or, sur une plante comme le maïs (Cherouvier, 1977), cette distribution a plusieurs formes possibles selon les variétés et les années (cf. fig. 3) : unimodale symétrique (LG 11 en 1974), dissymétrique (LG 11 en 1975 et INRA 258 en 1974) ou à tendance bimodale (INRA 258 en 1975).

e) De plus, on supposera que l'erreur résiduelle $e_i(t)$ sur chaque individu est totalement indépendante de son écart t_i [1].

f) Enfin, nous raisonnerons dans des intervalles de temps où l'on peut admettre que la dérivée seconde par rapport au temps de la loi de croissance est pratiquement constante :

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \simeq \text{Cte} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^3 F}{\partial t^3} \simeq 0 . \tag{8}$$

3. — *Développement et conséquences du modèle simple*

Grâce aux hypothèses *c*) et *f*), l'expression (4) admet un développement par la formule de Taylor jusqu'au deuxième degré :

$$y_i(t) = F - t_i F' + \frac{t_i^2}{2} F'' + e_i(t) \tag{9}$$

expression où F' et F'' sont les écritures simplifiées des dérivées première et seconde par rapport au temps de la fonction de croissance F.

a) *Conséquence sur la moyenne des mesures de croissance.*

$$\bar{y}(t) = F + \frac{m_2}{2} F'' . \tag{10}$$

Cette expression montre que, pour tout l'intervalle de temps où la croissance n'est pas linéaire ($F'' \neq 0$), la moyenne des mesures ne suit pas exactement la loi de croissance F des individus. D'autre part, deux populations, dont tous les individus suivent une loi de croissance F commune et non linéaire, ont des moyennes qui évoluent différemment lorsque les deux distributions des t_i ont des variances m_2 différentes.

b) *Conséquence sur la variance des mesures de croissance.*

Si $M_2(t)$ est la variance des mesures de croissance, grâce aux hypothèses *b*), *c*), *d*), *e*), on aura :

$$M_2(t) = m_2 F'^2 + \frac{(m_4 - m_2^2)}{4} F''^2 + \sigma^2 \tag{11}$$

---

[1] En conséquence, si G et H sont des fonctions respectivement de e_i et t_i, et si E signifie « Espérance mathématique ». On a :

$$E[G(e_i).H(t_i)] = E[G(e_i)].E[H(i)]$$

par exemple $E[e_i^2.t_i^2] = \sigma^2 m_2$.

et, grâce à l'hypothèse f ($F''' = 0$), il vient :

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} = 2\, m_2\, F'\, F'' \tag{12}$$

expression remarquable qui permet de décrire l'évolution de la variance (fig. 4*b*).

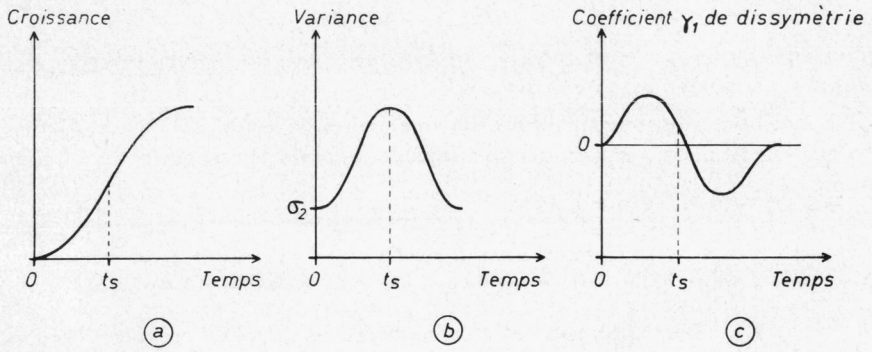


FIG. 4. — *Evolution* a) *de la moyenne*, b) *de la variance*, c) *du coefficient de dissymétrie* ($\gamma_1 = M_3/M_2^{3/2}$) *pour une croissance du type logistique* (*cas du modèle simplifié*).

Evolution of a) *mean*, b) *variance*, c) *coefficient of skewness* ($\gamma_1 = M_3/M_2^{3/2}$) *for a logistic type growth* (*simplified model*). (Absc. = Time.)

c) *Conséquence sur la symétrie des distributions de mesures de croissance.*

Si $M_3(t)$ est le moment centré d'ordre trois, grâce aux hypothèses *b*), *c*), *d*), e), il vient :

$$M_3(t) = \left[\frac{1}{8}(m_6 - 3\, m_2\, m_4 + 2\, m_2^3)\, F''^2 + \frac{3}{2}(m_4 - m_2^2)\, F'^2\right] F'' . \tag{13}$$

Dans cette expression, la partie entre les [ ] est positive, lorsque la distribution des t_i (qu'on a supposé symétrique) est proche d'une loi de Gauss. En effet, lorsque la distribution des t_i suit parfaitement une loi de Gauss, on a :

$$m_4 = 3\, m_2^2 \tag{14}$$

$$m_6 = 15\, m_2^3 . \tag{15}$$

Et l'expression (13) devient :

$$M_3(t) = [m_2^3\, F''^2 + 3\, m_2^2\, F'^2]\, F'' . \tag{16}$$

La partie entre crochets [ ] de (16) est bien toujours positive.

Le facteur de F'' dans (13) est également positif pour des distributions symétriques très éloignées de la loi de Gauss, puisqu'on peut démontrer aisément qu'il l'est aussi lorsque la distribution des t_i est parfaitement uniforme.

Par conséquent, le moment $M_3(t)$ est toujours positif si $F'' > 0$ et négatif lorsque F'' est négatif. Cela signifie que la distribution des mesures de croissance est toujours dissymétrique à gauche si $F'' > 0$ et dissymétrique à droite si $F'' < 0$ (fig. 4*c*). Et lorsque la croissance se termine sans blocage d'un facteur limitant ($F'' = 0$), la distribution redevient symétrique.

IV. — Principes d'utilisation du modèle

On peut donc établir à partir des formules (11), (12) et (13) les lois d'évolution de la variance et du moment centré d'ordre trois — ou du coefficient de dissymétrie de $\gamma_1 = M_3/(M_2)^{3/2}$ — pour n'importe quel type de croissance pourvu qu'on en ait déterminé l'expression mathématique.

L'important à noter est surtout que ces évolutions découlent des lois de vitesses et d'accélération *instantanées* de la croissance : ce qui signifie que même des mesures effectuées *sur des échantillons d'individus différents d'une date à une autre* vont suivre ces lois si les hypothèses sont vérifiées. Par conséquent, si l'on connaît les caractéristiques de la distribution des $t_i(m_2, m_4, m_6)$ et la variance σ^2 de la fonction aléatoire $e_i(t)$, on peut théoriquement déduire des moments centrés M_2 et M_3 à un instant t, la vitesse F' et l'accélération F'' de la croissance à cet instant grâce aux formules (11) et (13) !

En fait, le modèle n'est pas utilisable dans ce sens, avant d'avoir vérifié toutes les hypothèses. Pour cela, plusieurs dates de mesures antérieures sont nécessaires surtout si les mesures sont destructives, c'est-à-dire effectuées sur des individus différents d'une date à une autre, puisque les seuls critères dont on dispose alors sont les lois d'évolution (11), (12) et (13). De plus, nous avons seulement établi que ces relations sont *nécessaires*, mais absolument pas qu'elles sont *suffisantes*.

Aussi, les relations (11), (12), (13) doivent surtout servir à distinguer dans la réalité expérimentale les hypothèses du modèle qui sont vérifiées de celles qui ne le sont pas : *le modèle doit être considéré comme une norme idéale qui permet de mesurer les distances entre plusieurs situations expérimentales et*, en particulier, les différences de passage entre développement et croissance.

De ce point de vue, c'est la hiérarchie existant entre les diverses hypothèses qui doit servir de support au raisonnement :

1) Le modèle concerne exclusivement la croissance d'entités élémentaires d'organogenèse. Il peut se trouver vérifié pour un ensemble d'organes (Simon et Delecolle, 1974), mais en raison de conditions particulières qui méritent une discussion approfondie que nous excluons pour l'instant.

2) Les courbes individuelles de croissance se déduisent les unes des autres par une simple translation le long de l'axe des temps : opération qui définit la distribution des t_i. Sinon, il faut se référer au modèle (3).

3) Il faut qu'il n'y ait aucun blocage de la croissance par un facteur limitant, car alors la vitesse F' et l'accélération F'' ne sont plus définies.

4) La distribution des t_i, caractéristique de l'étalement des débuts de croissance et, en fait, de toute l'histoire de l'ontogenèse parcourue, est unimodale et symétrique.

5) La période de croissance est décomposable en plusieurs intervalles de temps durant lesquels F''' est pratiquement nulle.

6) Les déviations par rapport aux cinq hypothèses précédentes sont entièrement explicables par une fonction aléatoire stationnaire normale $N(0, \sigma)$ qui est indépendante de la distribution de t_i.

Pratiquement, on pourra admettre que les cinquième et sixième hypothèses sont vérifiées.

Par conséquent, lorsqu'on aura toutes les raisons de penser que les mesures à analyser concernent la croissance d'une entité élémentaire d'organogenèse (1re hypothèse), on établira d'abord l'histogramme de fréquences des individus qui dépassent le plus petit seuil mesurable de croissance, puis on comparera les évolutions des variances et des moments centrés d'ordre trois aux relations (11) et (13) ou aux figures 4*b* et 4*c*, pour essayer de déterminer dans chaque intervalle de temps où F''' peut être considérée comme nulle, lesquelles des 2e, 3e et 4e hypothèses sont vérifiées.

V. — Contraintes d'échantillonnage

Bien sûr, l'utilisation du modèle pose des contraintes d'échantillonnage. Par exemple, pour qu'une évolution de variance entre deux dates soit significative, *il faut que la différence soit supérieure à l'intervalle de confiance de la variance résiduelle* σ^2 (*obtenue lorsque* $F' = F'' = 0$).

Pratiquement, pour qu'une différence de variances entre deux dates de quatre fois la variance résiduelle (s^2) observée (ou une différence d'écart-type de deux fois et demi l'écart-type résiduel observé) soit significative, *il faut des échantillons d'au moins dix individus.*

Le calcul de l'intervalle de confiance d'un coefficient de dissymétrie est beaucoup plus complexe que celui d'une variance. Pratiquement, il n'est pas encore accessible pour des non-spécialistes. Par contre le calcul de l'intervalle en dehors duquel le coefficient de dissymétrie γ_1 est significativement différent de zéro (test de normalité de Pearson) est classique (Snedecor et Cochran, 1967 ; d'Agostino et Pearson, 1973) ; ce test permettra déjà de voir si l'évolution de γ_1 sort de l'hypothèse de la normale pour les dates où F'' est maximum en valeur absolue. Mais, bien sûr, on comparera aussi l'évolution réelle du coefficient γ_1 à l'évolution théorique (fig. 4*c*).

Pratiquement, *l'utilisation du test de Pearson sur le coefficient de dissymétrie exige un minimum de trente individus.*

VI. — Exemples d'utilisation

Dans beaucoup d'expériences, la taille des échantillons autorise seulement une analyse de l'évolution des variances. C'est le cas d'une étude (Delecolle, 1979) sur la croissance de la tige des maîtres-brins d'un blé (variété Talent) où les échantillons comptent de dix à quinze individus suivant les dates. Les mesures ayant été faites sur chaque entité élémentaire d'organogenèse (Vincent et Malet, 1977) il est possible d'utiliser le modèle.

La croissance du 4e entre-nœud (fig. 6*a*) a la forme caractéristique de la figure 4*a*, mais avec deux incidents de parcours : les segments ab et cd, qui, *a priori*, peuvent s'expliquer l'un et l'autre par les erreurs d'échantillonnage.

Or, pour les entre-nœuds du blé la division cellulaire se fait en deux phases (Vincent, 1977) : d'abord une phase de division cellulaire très lente, correspondant à la période qui se termine ici le 8 avril, ensuite une phase de division cellulaire rapide qui s'arrête à peu près au moment du point d'inflexion de la courbe de croissance. Par

conséquent, le modèle simplifié s'applique seulement à partir de la phase de division cellulaire rapide. D'ailleurs, l'évolution du pourcentage d'individus dépassant une croissance d'un millimètre, qui caractérise approximativement l'étalement des débuts de la première phase de division cellulaire, n'est pas symétrique (fig. 5*a*). Mais il est parfaitement possible que, dans cette première phase, les plantes en retard rattrapent les plantes en avance (phénomène que peut décrire le modèle général) et que finalement la distribution des t_i devienne symétrique au début de la deuxième phase de division cellulaire.

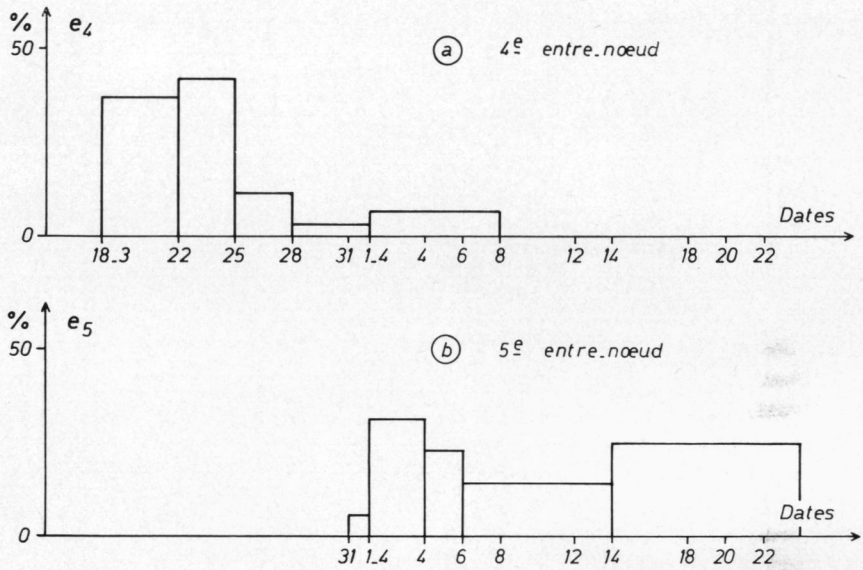


FIG. 5. — *Histogramme du début de croissance mesurable sur les* 4e (e_4) *et* 5e (e_5) *entre-nœuds du blé Talent : pourcentage d'individus dépassant* 1 mm *entre deux dates* (*d'après Delecolle*, 1979).

Histogram of early measurable growth for the 4th (e_4) *and the* 5th (e_5) *internodes of a winter wheat* (*Talent*). (Absc. = Time ; Ord. = Relative frequency of internodes surpassing 1 mm level between two dates.)

Dans ces conditions, le modèle simple devient utilisable : il permet de détecter, à partir de l'expression (12), un arrêt momentané de croissance ($F' = 0$) ou un ralentissement ($F'' = 0$) le long du segment ab, puisque l'écart-type reste constant ; au contraire, l'augmentation des écarts-types entre c et d indique que le point d est sans doute consécutif à une erreur d'échantillonnage ; le point d'inflexion ($F'' = 0$) se situe d'ailleurs juste après d, car, comme le prévoit le modèle (cf. fig. 4), l'écart-type chute entre d et e ; enfin, les oscillations de l'écart-type final représentent les erreurs possibles d'échantillonnage.

Pour le cinquième entre-nœud, de l'histogramme des débuts de la division cellulaire (fig. 5*b*) et du niveau de l'écart-type en fin de croissance (fig. 6*b*), on peut déduire que, là encore, le modèle simple ne s'applique pas avant le 20 avril, début de la phase rapide de division cellulaire.

Mais surtout, pour ce cinquième entre-nœud, l'évolution de l'écart-type (fig. 6*b*), qui a *deux maxima* au lieu d'un seul (cf. fig. 4*b*), permet de détecter un véritable frei-

nage ($F'' < 0$) de la croissance entre le 25 avril et le 2 mai : il faut évidemment en rechercher les causes parmi les facteurs du milieu. Il est clair qu'on ne pouvait pas déduire ce résultat avec autant de certitude de la simple évolution des moyennes des mesures (fig. 6*a*).

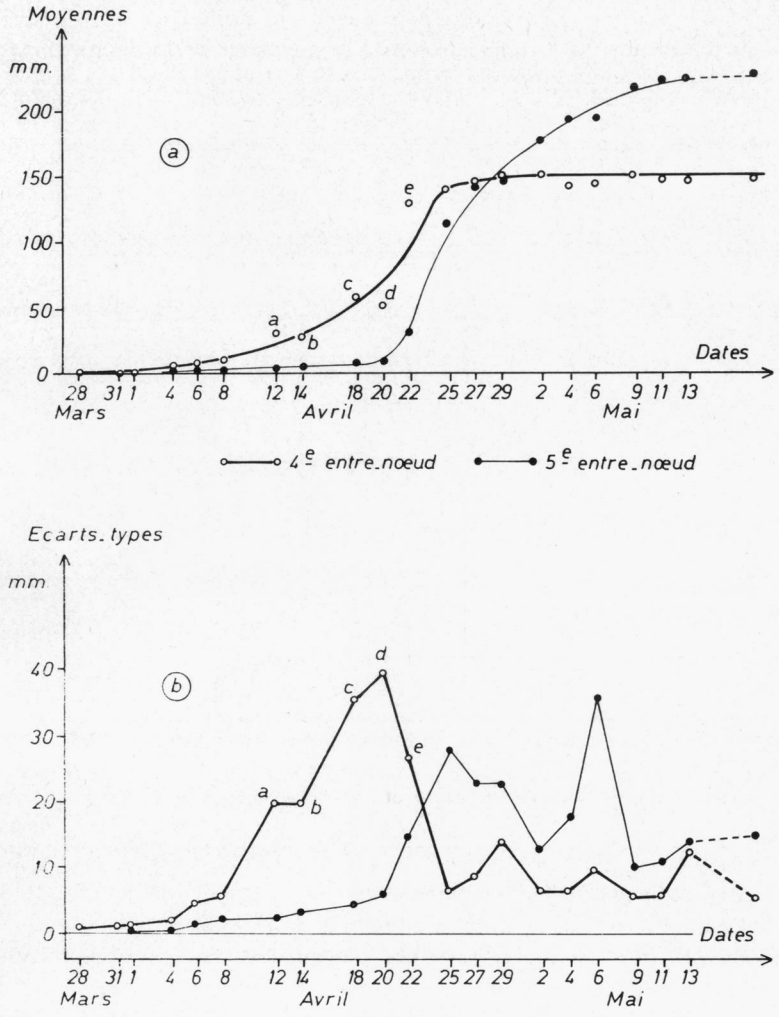


FIG. 6. — *Croissance des* 4e *et* 5e *entre-nœuds du blé Talent (d'après Delecolle, 1979).* (Les différences significatives (P = 0,95) entre deux écarts-types sont de 13,7 mm pour le 4e entre-nœud et de 15,4 mm pour le 5e.)

Growth of Talent wheat's 4th *and* 5th *internodes.* The significative differences (P = 0.95) between two standard-deviations are 13.7 mm for the 4th internode and 15.4 mm for the 5th one. (Absc. = Time ; Ord. = *a*) Mean ; *b*) Standard deviation.)

Certains de ces résultats pouvaient également se déduire de l'évolution de l'écart-type de la somme des deux entre-nœuds (fig. 7*b*). Cependant il aurait été difficile d'interpréter correctement la diminution de l'écart-type entre le 20 avril et le 2 mai :

car cette diminution est provoquée d'abord par la désaccélération « normale » de la croissance du 4e entre-nœud entre le 20 et le 25 avril, puis par une désaccélération « anormale » de la croissance du 5e entre-nœud du 25 avril au 2 mai (fig. 6*b*). Cet exemple montre que *le modèle n'est pas utilisable pour un ensemble d'entités élémentaires d'organogenèse sans de nombreuses précautions.*

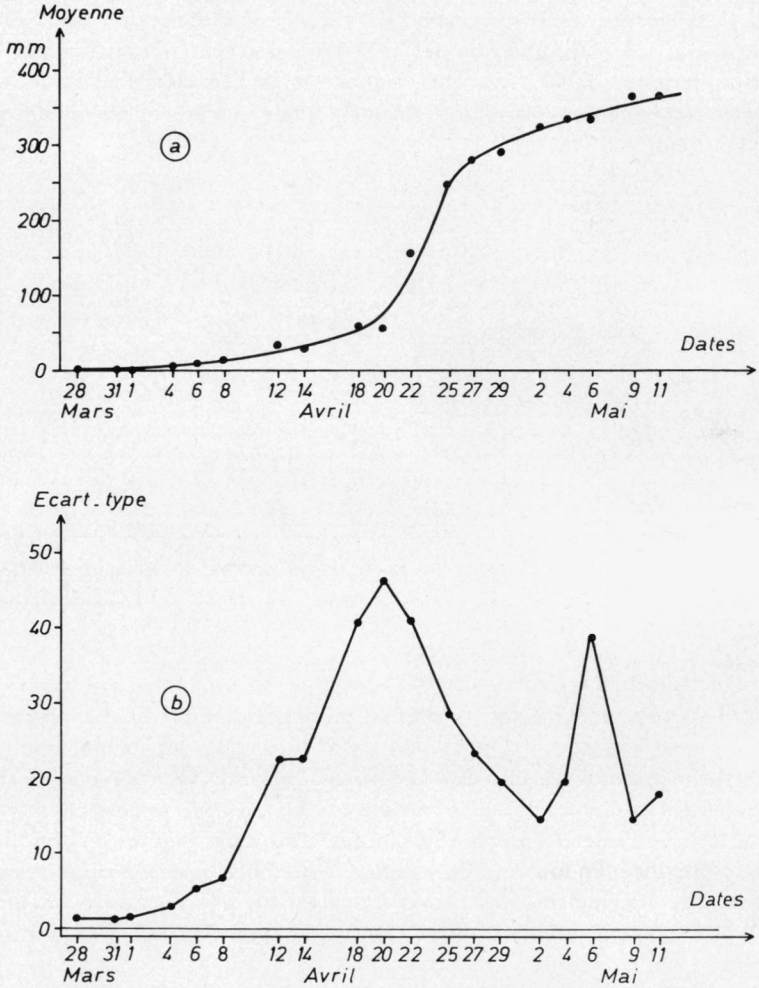


FIG. 7. — *Croissance de la somme des 4e et 5e entrenœuds du blé Talent.*
Growth of Talent wheat's 4th and 5th internodes. Sum of internode lengths.
(Absc. = Time ; Ord. = *a*) Mean ; *b*) Standard deviation.)

Interprétation des coefficients de dissymétrie

D'après les expressions (13) ou (16), une distribution de mesures de croissance doit redevenir symétrique et même son coefficient γ_1 nul (cf. fig. 4*c*) lorsque la croissance se termine ($F' = F'' = 0$). Mais ceci est vrai à condition que la vitesse F' existe et ne soit

pas devenue nulle seulement en apparence : à la suite de l'intervention d'un ou plusieurs facteurs limitants.

Pour illustrer ceci, nous prendrons pour exemple les croissances en 1974 des épis de deux variétés de maïs (Cherouvrier, 1977) dont nous avons précédemment présenté l'étalement de la floraison femelle (fig. 3*a*). En effet, soixante épis étaient pesés à chaque date un par un. Nous supposerons d'abord que la symétrie des t_i s'était maintenue jusqu'au début des mesures pour la variété LG 11 et s'était établie pour INRA 258.

Ensuite, nous ferons abstraction des évolutions des écarts-types (fig. 8*b*) qui indiquent sans ambiguïté que les croissances suivent le modèle général et non le modèle simple. Notre raisonnement sera donc purement théorique et, en conséquence, nous le conduirons au conditionnel.

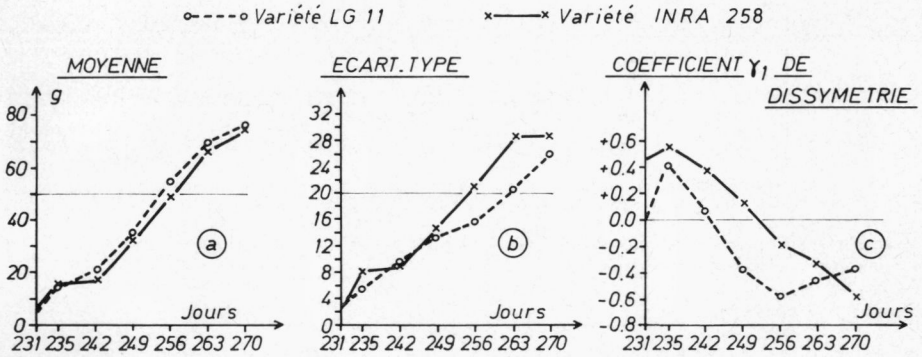


FIG. 8. — *Croissance en matière sèche des épis de maïs (d'après Cherouvrier, 1977).*

Growth of dry matter of maize ear. (Absc. = Time ; Ord. = *a*) Mean ; *b*) Standard deviation ; *c*) Coefficients of skewness γ_1.)

Les coefficients de dissymétrie (fig. 8*c*) suivent relativement bien l'évolution prévue (fig. 4*c*), sauf qu'aucune des deux variétés, et plus spécialement LG 11, ne revient à la symétrie en fin de croissance. On devrait en déduire que des facteurs limitants ont arrêté la croissance avant que les variétés aient pu exprimer leur potentialité réelle. On devrait également se demander si la variété LG 11 n'est pas potentiellement la plus productive, lorsque l'une et l'autre sont placées dans leurs meilleures conditions respectives de croissance. En tout cas, on voit tout le bénéfice que peut apporter l'analyse comparative des dissymétries des distributions en fin de croissance en utilisant le modèle simple, lorsqu'il est vérifié pour toutes les hypothèses autres que la définition de la vitesse de croissance.

Conclusion

Il faut descendre au niveau des organes et même parfois des parties constitutives des organes pour distinguer sans ambiguïté le développement de la croissance. Mais alors, les conditions de passage du développement à la croissance pour une population d'une de ces entités élémentaires d'organogenèse, peuvent être décrites par la distribution des instants où chaque individu passe de la fin du développement au début de la croissance.

Grâce à cette distribution, les diverses caractéristiques statistiques (en particulier la variance et le coefficient de dissymétrie) de la distribution des mesures de croissance

dépendent étroitement à chaque instant de la vitesse et de l'accélération *instantanée* de la croissance.

Cette relation, véritablement spatio-temporelle peut être décrite par un modèle statistique. Avec des hypothèses supplémentaires correspondant à des conditions optimales pour la croissance d'une entité élémentaire d'organogenèse, ce modèle peut alors servir de référence *pour détecter dans une croissance réelle les principales divergences par rapport à des conditions optimales*. En particulier, il permet de mesurer l'influence de conditions limitantes pendant une phase de développement sur la croissance postérieure. Il peut aussi déceler si le niveau atteint en fin de croissance par l'organe étudié correspond ou non au potentiel du programme génétique.

Ce modèle offre donc des perspectives intéressantes pour les études éco-physiologiques et pour la sélection génétique.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Summary

Statistical relationship between plant development and growth : A simplified model for analysing growth

First, it is shown that for plants a clear boundary between development and growth may be established only for organs, or parts of organs, the initiation whose beginning can be precisely stated. For such « elementary organogenesis entities », development includes the phases of initiation and latency which precede the growth itself.

A statistical link between development and growth then exists. The growth variability within a population is shown to be directly dependent on the variability of the time when each elementary organogenesis entity completes its development phase. This leads to a general statistical growth model (expression 3, fig. 1) which takes into account distribution of times (t_i) when the growth for each plant starts.

Specific conditions are then determined for which $Y_i(t)$, the growth achieved at every time t by an elementary organogenis entity i, can be expressed in the simple form : $Y_i(t) = F(t - t_i) + e_i(t)$, where t_i is the beginning of the concerned growth phase for each plant and $e_i(t)$ the residual error. It is shown that, under these conditions, the theoritical evolutions of variances (expressions (11) and (12), fig. 4*b*), and skewness coefficients (expressions (13) and (16), fig. 4*c*) become powerful tools for the analysis of growth, especially to determine the periods when one or several factors became limiting.

Zusammenfassung

Statistische Verbindung zwischen Entwicklung und Wachstum der Pflanzen Anwendung eines vereinfachten Modellvorstellung auf die Wachstumsanalyse

Es wird eingangs dargelegt dass bei den Pflanzen der Unterschied zwischen der Entwicklung und dem Wachstum nur in Höhe der Organe oder Organteile deren Blütenansatzdatum genau ausfindig gemacht werden kann, möglich ist. Bei einer solchen « elementaren Wesenheit der Organbildung » besteht die Entwicklung in einer Latenzphase und einer Blüteansatzphase welche dem eigentlichen Wachstum vorangehen.

Es besteht sodann eine « statistische » Verbindung zwischen der Entwicklung und dem Wachstum. Es wird tatsächlich gezeigt dass die Variabilität des Wachstums innerhalb eines Bestandes direkt abhängig ist von der Variabilität des Zeitpunktes an welchem jede elementare Wesenheit der Organbildung seine Entwicklungsphase beendet. Dies führt zu einem allgemeinen Wachstumsmodellvorstellung welches die Verteilung der Zeitpunkte « ti » an welchen das Wachstum jeder Pflanze beginnt, in Betracht zieht.

Es werden sodann die besonderen Bedingungen bestimmt bei welchen das am Zeitpunkt « t » erreichte Wachstum « Yi(t) » durch eine elementare Wesenheit der Organbildung « i » sich mittels einer vereinfachten Formel ausdrücken lässt :

$$Yi(t) = F(t - ti) + ei(t)$$

worin « ti » die für jede Pflanze in Betracht gezogene Wachstumsphase darstellt und « ei(t) » der Restfehler. Es wird dargelegt dass unter diesen Bedingungen die Entwicklung der Varianzen und der Unsymetriekoeffizienten sehr wirksame Mittel der Wachstumsanalyse werden, im besonderen um die Zeiträume in welchen ein oder mehrere Faktore begrenzend geworden sind, ausfindig zu machen.

РЕЭЮМЕ

Статистическая связь между развитием и ростом растений : применение упрошенной модели при анализе роста.

МАЛЕ Ф.

Доказывается, прежде всего, что различие между развитием и ростом растений возможно только на уровне органов, или частей органов, дату зачатка которых можно установить с точностью. У такого « элементарного существа органогенеза » развитие заключает также изначальную стадию и скрытый латентный период предшествующие росту в узком смысле слова.

Существует значит « статистическая » связь между развитием и ростом. Ибо, доказывается, что внутри-популяционная изменчивость находится в прямой зависимости от изменчивости времени в течении которого каждое элементарное существо органогенеза заканчивает фазу своего развития. Это приводит к созданию общей модели роста, принимающей во внимание распределение времени (ti) начала роста каждого растения.

Тогда является возможность определить особенные условия при которых рост Уi(t) достигающийся в течении отрезка времени t элементарным существом органогенеза i можно выразить упрощенной формулой Уi(t) = F(t — ti) + ei(t), в которой ti — представляет начало фазы роста каждого рассматриваемого растения и ei(t) — остаточную ошибку.

Доказывается также, что в этих условиях, эволюция квадратов типичной разницы и коэффициентов диссиметрии, становится очень эффективным инструментом дпя анализа, в особенности при определении периодов в течении которых один, или несколько факторов делаются ограничивающими.

Références bibliographiques

BUIS R., 1974. Analyse factorielle : ses principes, sa place dans la biologie quantitative de la croissance et du développement. *Physiol. Vég.*, **12** (3), 467-487.

CHEROUVRIER A., 1977. *Contribution à la connaissance éco-physiologique du maïs sous climat atlantique.* Thèse de 3e cycle. Université de Rennes, 315 p.

D'AGOSTINO R. B. et PEARSON E. S., 1973. Tests from normality. Empirical results for the distribution of b_2 and b_1. *Biometrika*, **70** (3), 613-628.

DELECOLLE R., 1979. Travaux non publiés.

FERRET J. P., 1975. *Contribution à l'étude du cycle de végétation du maïs par le biais des distributions de fréquences.* Mémoire Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 140 p.

KOYAMA H. et KIRA T., 1956. Intraspecific competition among higher plants. VIII. Frequency distribution of individual plant weight as affected by the interaction between plants. *Journ. Inst. Polytechn. OSAKA*, **7**, 73-94.

MALET Ph., 1969. *Essais d'irrigation des betteraves à sucre avec des eaux salées et sur sol alcalinisé à Bou Salem.* Tunisie C.R.E.G.R., Document Technique N° 131.HAD.46, 24 p.

SNEDECOR G. W. et COCHRAN W. G., 1967. *Statistical methods.* The Iowa State University Press, AMES, Iowa, USA, 593 p.

SIMON J. C. et DELECOLLE R., 1974. *Maïs et bocage.* Thèse de 3e cycle. Université de Rennes, 342 p.

VINCENT A. et MALET Ph., 1977. Principes de fonctionnement intégré du blé. *Bull. de liaison du Dép. d'Am. des Plantes*, 5, 282-288.

VINCENT A., 1977. Communication personnelle.

Ann. agron., 1979, **30** (5), 431-442.

Influence de la température des racines sur la croissance des laitues et des tomates. Incidence sur leur composition lipidique

P. CORNILLON * et M. BOUDON **

* *Laboratoire d'Agronomie,*
Station de Science du Sol,
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon,
84140 *Montfavet*

** *Station de Recherches de Nutrition,*
Centre national de Recherches zootechniques,
78350 *Jouy-en-Josas*

Résumé

Des plantes de Laitue et de Tomate ont été cultivées en solution nutritive avec une température au niveau des racines constante et égale à 12 °C et à 22 °C.

Lorsque la température du milieu racinaire est maintenue à 12 °C, la croissance de la Laitue reste presque normale tandis que celle de la Tomate est extrêmement réduite.

Cette différence de comportement à basse température se traduit par des modifications de la teneur en lipides d'autant plus importantes que la plante est plus sensible au froid. A 12 °C, la Laitue et la Tomate présentent un premier palier d'adaptation au froid qui se traduit par une forte synthèse d'acide linolénique qui permet de garder une grande fluidité aux membranes. La plus grande sensibilité au froid de la Tomate conduit en outre à une moindre production d'acide palmitique et surtout cette espèce synthétise une importante quantité d'acides gras à chaîne latérale qui ne se retrouvent pas dans les racines de Laitue.

I. — Introduction

L'étude de la température des racines nous a permis d'observer l'influence profonde de ce facteur du milieu sur la croissance et le développement des espèces (Cornillon, 1974). Cette action dépend, en partie, de l'origine géographique des plantes. Kramer (1969) a relevé que les plantes originaires des régions chaudes ont des exigences élevées en température des racines tandis que les espèces originaires des zones froides ont des besoins plus réduits.

Cette différence de réaction suggère un comportement variable des espèces quand on abaisse ou inversement quand on augmente la température des racines. Elle peut s'expliquer par une modification de la composition des racines et par une variation de l'activité métabolique cellulaire puisque les travaux faits en culture hydroponique éliminent les effets indirects de la température.

Pour apporter des éléments de réponse aux problèmes de la croissance aux basses températures des racines, nous avons effectué une étude en utilisant deux espèces dont les besoins sont opposés : la Laitue et la Tomate. La Laitue est une espèce originaire des régions tempérées froides de l'Asie et elle peut être cultivée en hiver dans le midi méditerranéen. Par contre, la Tomate vient de régions chaudes et humides de l'Amérique du Sud et sa culture est mise en place au printemps en plein champ.

Après avoir précisé les conditions expérimentales, nous présenterons les résultats concernant la croissance de la plante en relation avec les modifications de teneurs en acides gras à deux températures distinctes : 12 °C et 22 °C.

II. — Méthodologie

II.1. — *Choix des températures du substrat*

Les températures retenues, 12 °C et 22 °C, tiennent compte des besoins spécifiques de la Laitue et de la Tomate. La première espèce croît normalement à ces deux températures tandis que la Tomate pousse bien à 22 °C mais sa croissance est fortement ralentie à 12 °C (Cornillon, 1974). La température était uniforme au niveau des racines grâce à l'emploi de la culture hydroponique avec une alimentation en air comprimé qui assurait l'aération et l'homogénéisation de la solution nutritive. Les températures de l'air ambiant ont varié entre 22 °C et 25 °C le jour et 16 °C et 23 °C la nuit.

II.2. — *Conditions de culture*

Le tableau 1 donne la composition ionique de la solution réalisée avec de l'eau déminéralisée et complétée avec les oligo-éléments essentiels pour la croissance et le développement du végétal.

TABLEAU 1

Compostition de la solution nutritive (meq. l^{-1})
Composition of the nutrient solution (meq. l^{-1})

Anion	Cation					
	NH_4^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	H^+	Total
NO_3^-		3,5	3,0			6,5
PO_4H^{--}	0,5				1,0	1,5
SO^{--}				1,0		1,0
Total	0,5	3,5	3,0	1,0	1,0	9

Deux cultures ont été effectuées successivement avec la même variété de Laitue (Mantilla) et de Tomate (H 63-5) pour prendre en compte l'effet possible de l'époque de croissance sur la composition lipidique des racines.

Au printemps, après un semis effectué le 26 avril et un repiquage le 15 mai, l'essai s'est déroulé pendant 18 jours, du 22 mai au 9 juin. Le prélèvement du système racinaire a été effectué à la fin de l'essai.

A l'automne, le semis a été effectué le 15 septembre et le repiquage le 28 septembre. L'essai a été suivi entre le 3 et le 24 octobre avec échantillonnage à la fin du traitement.

Etant donné l'identité des résultats obtenus à partir des deux cultures, nous ne rapporterons dans ce mémoire que ceux relatifs à l'essai du printemps.

La consommation d'eau de chaque plante est notée tous les 3 jours et ensuite tous les 2 jours pendant la durée de l'essai. L'évaporation est pratiquement nulle parce que l'air comprimé qui permet l'aération de la solution nutritive est saturé en vapeur d'eau.

A la fin de l'essai, huit plantes de Laitue et de Tomate sont prélevées pour déterminer la production de matière sèche en fonction du traitement. Les différents organes de chaque plante sont rapidement séparés : racine, tige, pétiole et limbe. Chaque fraction de la plante est ensuite lavée à l'eau permutée, séchée et pesée pour obtenir le poids de la matière sèche.

II.3. — *Extraction et analyse des lipides*

La fixation des racines est réalisée par congélation à — 30 °C immédiatement après le prélèvement et le lavage des échantillons.

Pour obtenir une extraction quantitative des acides gras, nous avons utilisé l'hydrolyse acide à 100 °C des tissus végétaux (Leroy et François, 1952). Les racines finement pulvérisées sont traitées par l'acide chlorhydrique à 10 p. 100 pendant 6 h, au bain marie bouillant, sous réfrigérant à air. La neutralisation est obtenue avec un excès de potasse et on ajoute de l'éthanol de façon à obtenir un milieu final contenant environ 5 p. 100 de potasse et 50 p. 100 d'alcool.

La saponification est réalisée en maintenant l'ébullition pendant 2 h sous réfrigérant à air et on extrait l'insaponifiable avec de l'hexane. La neutralisation est ensuite effectuée par HCl pur (d = 1,19) tout en maintenant le titre alcoolique constant. Les acides gras sont extraits avec l'hexane que l'on évapore et sèche avant pesée.

Les acides gras sont ensuite méthylés et les esters méthyliques sont analysés par chromatographie en phase gazeuse en utilisant une colonne capillaire en verre imprégnée de FFAP (32 m × 0,37 mm de diamètre interne) à 190 °C.

III. — Résultats

III.1. — *Croissance*

A la fin de l'essai, nous avons noté la production totale de matière sèche et sa répartition entre les différents organes (fig. 1). Nous pouvons noter une réaction très différente de la Laitue et de la Tomate aux deux traitements. La première espèce réagit peu à cette modification importante de la température des racines puisque le Q_{10} est égal à 1,33 tandis que la valeur du Q_{10} atteint 2,46 pour la Tomate. Le Q_{10} correspond au nombre par lequel est multiplié la production de matière sèche lorsque la température s'élève de 10 °C.

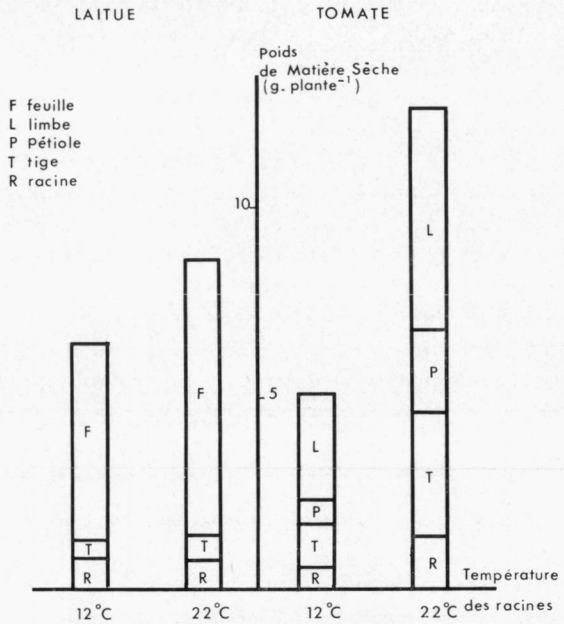


FIG. 1. — *Influence de la température des racines sur la production de matière sèche.*
Influence of root temperature on the dry matter weight.

La répartition de la matière sèche entre les différents organes est peu modifiée pour la Laitue avec cependant une importance plus grande du système racinaire par rapport à la partie aérienne à basse température. Pour la Tomate, il apparaît une modification du pourcentage des divers organes de la partie aérienne ; la température la plus élevée favorise les organes conducteurs : tige et pétiole au détriment du limbe.

La consommation hydrique permet une autre approche de la croissance des plantes (fig. 2). Nous pouvons observer de nouveau le comportement opposé de la Laitue et de la Tomate. En effet, la consommation d'eau de la Laitue est égale à 1,46 l par plante pour la période de 18 jours à 12 °C et de 2,0 l à 22 °C ce qui donne un Q_{10} égal à 1,36 pour la consommation d'eau. Et pour la Tomate, cette consommation est égale à 0,95 l à 12 °C et à 3,12 l à 22 °C, ce qui fournit un Q_{10} égal à 3,30. Dans le cas de la Laitue, la valeur du Q_{10} est voisine pour la production de matière sèche et pour la consommation en eau ; par contre, pour la Tomate, il apparaît une certaine dérive entre ces deux caractéristiques. Mais l'allure générale du phénomène permet de voir pour la Laitue une croissance normale à 12 °C ; par contre celle de la Tomate est fortement réduite pour ce traitement.

A partir de la consommation en eau et de la production de matière sèche nous pouvons calculer l'efficience de l'eau :

		Eau consommée (l)	Matière sèche (g)	Efficience
		—	—	—
Laitue	12 °C	1,46	6,47	4,43
	22 °C	2,00	8,63	4,32
Tomate	12 °C	0,95	5,13	5,40
	22 °C	3,12	12,64	4,05

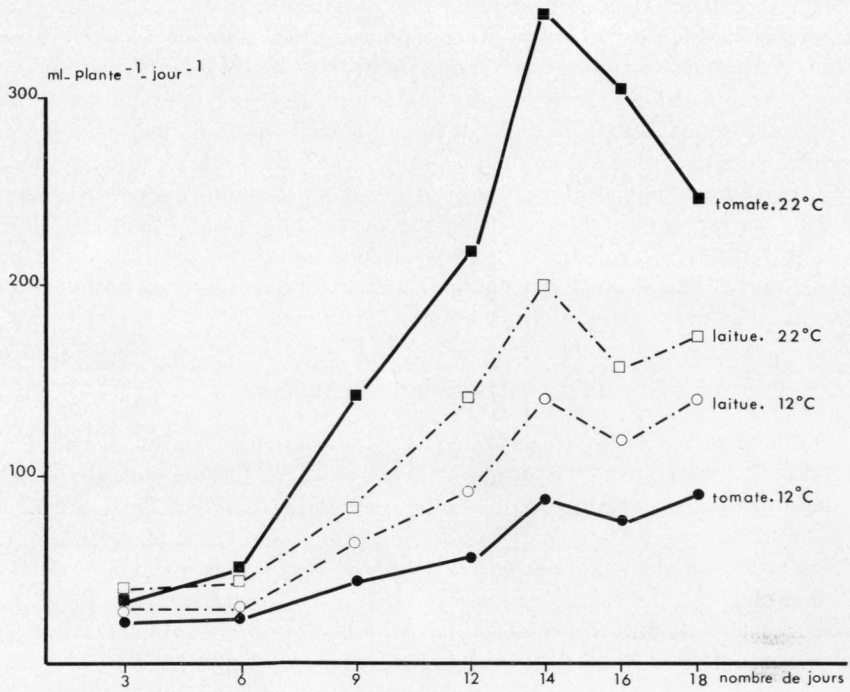


FIG. 2. — *Influence de la température des racines sur la consommation en eau des plantes de Laitue et de Tomate.*

Influence of root temperature on water absorption by Lettuce and Tomato.

Nous pouvons remarquer une action différenciée de la température selon l'espèce. Cette action est très faible sur la Laitue, mais elle est plus importante pour la Tomate avec une efficience supérieure au traitement basse température. Cet effet suggère une analogie avec l'action de la sécheresse qui se caractérise aussi par une augmentation

TABLEAU 2

Influence de la température des racines sur la teneur en eau, la quantité d'eau et de matière sèche surfaciques du limbe des Laitues et des Tomates

Influence of root temperature on water content and quantities of water and dry matter in unit area of Lettuce and Tomato blades

Température	Laitue			Tomate		
	Eau	Matière sèche	Teneur en eau p. 100 de la matière sèche	Eau	Matière sèche	Teneur en eau p. 100 de la matière sèche
	surfacique $mg.cm^{-2}$			surfacique $mg.cm^{-2}$		
12 °C	23	2,5	920	16	4,8	333
22 °C	23	2,2	1 045	14	2,7	519

de l'efficience de l'eau. Cette observation irait plutôt dans le sens où la réduction de consommation en eau est la cause de la moindre production de matière sèche.

Nous retrouvons ce comportement opposé de la Laitue et de la Tomate quand on analyse des caractéristiques hydriques du limbe (tabl. 2). En effet, les quantités d'eau et de matière sèche surfaciques du limbe de la Laitue sont égales ou très peu différentes. Par contre, il apparaît une accumulation très marquée de matière sèche dans le limbe de la Tomate à basse température. Cet enrichissement en matière sèche du limbe correspond à une croissance ralentie de la plante. Ce phénomène peut être dû à un moindre grandissement cellulaire et à une accumulation des produits de la photosynthèse dans le limbe. Il peut être également en relation avec une résistance à l'absorption de l'eau accrue qui induirait un effet sécheresse.

III.2. — *Composition des racines*

Le tableau 3 fournit les caractéristiques générales des racines de Laitue et de Tomate dont la croissance s'est effectuée à 12 °C et à 22 °C. Ces résultats permettent de voir que la composition des racines de Laitue est très semblable à 12 °C et à 22 °C, à l'exception d'une légère augmentation d'azote organique à basse température. En ce qui concerne la Tomate, l'effet des basses températures est plus marqué puisque nous notons une plus forte teneur en azote organique et en lipides totaux à 12 °C. L'effet sur le pourcentage de matières minérales dépend de l'élément considéré avec accroissement modéré de P et K à 12 °C et appauvrissement en Ca et Mg.

TABLEAU 3

Composition des racines de Laitue et de Tomate en fonction de leur température (g p. 100 de matière sèche)

Influence of root temperature on the composition of Lettuce and Tomato roots (g per cent of dry matter)

Espèce	Laitue		Tomate	
Température	12 °C	22 °C	12 °C	22 °C
N organique.....	6,2	5,1	6,8	4,6
Lipides	2,95	2,95	3,05	2,45
P	1,08	1,03	0,85	0,71
K	7,4	7,5	6,6	5,5
Ca	0,45	0,45	0,45	0,40
Mg	0,16	0,19	0,22	0,47

III.3. — *Lipides des racines*

Les acides gras entrant dans la composition des lipides présentent des modifications qualitatives particulièrement importantes en fonction de l'espèce et surtout en fonction de la température des racines (tabl. 4).

III.3.1. — *Influence de l'Espèce.*

Nous trouvons pour les racines de Laitue et de Tomate trois acides gras majeurs identiques : acide palmitique (C 16 : 0), l'acide linoléique (C 18 : 2 ω 6) et l'acide linolénique (C 18 : 3 ω 3) qui représentent de 80 à 88 p. 100 des acides gras totaux dont la

TABLEAU 4

Influence de la température des racines sur la répartition des acides gras dans les racines de Laitue et de Tomate

Influence of root temperature on fatty acid distribution of Lettuce and Tomato roots

Acides gras	Laitue		Tomate	
	Racines 12 °C	Racines 22 °C	Racines 12 °C	Racines 22 °C
A. palmitique	21,0	22,3	17,1	21,4
A. stéarique	0,8	1,1	1,1	1,5
A. oléique	1,5	2,6	1,3	1,6
A. linoléique	45,5	48,5	45,0	45,9
A. linolénique	21,5	12,9	21,2	12,9
A. 15 méthylhexadécanoïque	0,2	0,3	5,8	3,8
A. érucique	0,9	1,2	0,7	1,1
A. béhénique	tr	1,9	1,2	1,5
A. tricosanoïque	0,2	0,4	0,6	1,1
A. ω 3 hexaenoïque	1,8	0,9	—	—
A. lignocérique	1,4	2,1	1,2	1,6
A. 13 méthyltétradécanoïque	tr	tr	0,8	0,7
A. 14 méthylpentadécanoïque	—	—	tr	0,1
A. 16 méhtylheptadécanoïque	—	—	0,2	0,1
A. 14 méthylhexadécanoïque	tr	tr	0,2	0,3

moitié est constituée par l'acide linoléique. Parallèlement, six acides gras dépassent le seuil de 1 p. 100 dans le cas de la Laitue et sept acides gras sont supérieurs à ce taux pour la Tomate. La plupart de ces acides gras secondaires sont communs aux racines de Laitue et à celles de Tomate : l'acide 15 méthyl-hexadécanoïque (iso C 17), l'acide érucique (C 20 : 1 ω 9), l'acide béhénique (C 22 : 0), l'acide tricosanoïque (C 23 : 0) et l'acide lignocérique (C 24 : 0). Par contre, on trouve dans les racines de Laitue un acide gras de la famille de l'acide linolénique, c'est-à-dire ayant une double liaison en position ω 3, qui est absent des racines de Tomate : l'acide ω 3 hexaénoïque (C 22 : 6 ω 3).

Une autre différence apparaît entre les deux espèces avec la présence dans les racines de Tomate d'une très importante fraction d'acides gras à chaîne latérale qui n'existe qu'à l'état de traces dans les racines de Laitue. Cette chaîne latérale correspond à un groupement méthyle qui se place sur l'avant-dernier carbone de la chaîne pour les acides iso ou sur l'ante penultienne carbone pour les acides ante iso. Dans les racines de Tomate, il y a 5 à 7 p. 100 de cinq acides iso et ante iso : l'acide 13 méthyltetradecanoïque (iso C 15), l'acide 14 méthylpentadecanoïque (iso C 16), l'acide 15 méthylhexadecanoïque (iso C 17), l'acide 16 méthylheptadecanoïque (iso C 18) et l'acide 14 méthylhexadecanoïque (ante iso C 17). En particulier, les racines de Tomate contiennent une forte quantité d'acide iso C 17 qui se retrouve seulement en très faible proportion dans les racines de Laitue. Il existe dans les racines toute une série d'acides gras à l'état de traces dont le nombre de carbone sur la chaîne varie de 14 à 25.

III.3.2. — *Influence de la température des racines.*

Les acides gras entrant dans la composition des lipides présentent des modifications quantitatives particulièrement importantes en fonction de la température. A

22 °C, le comportement de la Laitue et de la Tomate est très voisin, tandis qu'à 12 °C les réactions varient selon l'espèce.

Ainsi à 22 °C, la composition des racines en acides gras est assez voisine pour la Laitue et la Tomate avec environ 20 p. 100 d'acide palmitique, 46 à 48 p. 100 d'acide linoléique et 12 p. 100 d'acide linolénique. Mais à 12 °C, la teneur en acide palmitique s'abaisse chez la Tomate et reste constant pour la Laitue. Le taux d'acide linoléique varie très peu et celui d'acide linolénique augmente fortement pour les deux espèces. Cette augmentation du pourcentage d'acide linolénique correspond à une adaptation aux basses températures des racines. L'accumulation d'acides gras insaturés, dont le point de fusion est beaucoup plus bas, permet de garder une plus grande fluidité aux membranes. Ils évitent ainsi la transition de phase des membranes entre la forme cristal liquide et la forme gel solidifié. Ce changement entraînerait une modification de la perméabilité et une réduction des courants cytoplasmiques.

De plus, chez la Tomate, le taux d'acide 15 méthylhexadécanoïque augmente aux faibles températures comme nous l'avons déjà noté en relation avec une accumulation de leucine dont elle dérive (Hitchcock et Nichols, 1971). Les autres acides gras secondaires et en particulier l'acide stéarique, l'acide oléique et l'acide lignocérique subissent une diminution de leurs teneurs à faible température chez les deux espèces.

La principale différence de comportement entre les deux espèces se situe au niveau de l'acide palmitique (C 16 : 0). Dans les racines de Laitue sa synthèse est semblable à 12 °C et 22 °C tandis qu'elle est différente chez la Tomate à ces deux températures. Ainsi, il existe un parallélisme étroit entre la croissance normale et la synthèse d'acide palmitique chez la Laitue et la Tomate. Quand la croissance se réduit fortement, la teneur en acide palmitique des racines diminue au-dessous du seuil de 20 p. 100.

Discussion

Le métabolisme des lipides est modifié dans les racines de Laitue et surtout dans celles de Tomate maintenues à 12 °C par rapport à celles élevées à 22 °C (tabl. 4). A 22 °C, les plantes de Laitue, dont la croissance reste normale à basse température, ne contiennent pas plus d'acides gras insaturés que les plantes de Tomate qui sont sensibles au froid. A 12 °C, le métabolisme des lipides est d'autant plus perturbé que la plante est plus sensible au froid. En effet, dans les racines de Laitue, nous notons uniquement une augmentation du taux d'acide linolénique. Par contre, chez la Tomate, il se produit non seulement une modification comparable du pourcentage d'acide linolénique mais aussi une accumulation de lipides totaux et d'acide 15 méthylhexadécanoïque et une moindre synthèse d'acide palmitique.

Ainsi pour ces deux espèces dont la réaction aux basses températures est opposée, nous notons une réaction semblable en ce qui concerne les variations de la teneur en acide linolénique. Le taux de cet acide passe de 12,9 p. 100 à 22 °C à environ 21,0 p. 100 à 12 °C. Cette modification peut correspondre à une adaptation aux basses températures comme l'ont déjà noté plusieurs auteurs étudiant l'influence de ce facteur sur diverses espèces : le Blé d'hiver (de la Roche *et al.*, 1972; Willemot, 1977), le Coton (St. John Christiansen, 1976) et le Colza (Smolenska, Kuiper, 1977). Farkas (1975) a noté sur le Blé et sur le Seigle que leur résistance au froid est une fonction croissante

du taux d'acide linolénique. Ces expériences étaient conduites au champ et au laboratoire avec des températures voisines de 0 °C. Les expériences effectuées par ces auteurs étaient menées avec une température identique dans l'air et le substrat.

Cet enrichissement des racines en acides gras tri-insaturés, dont le point de fusion est beaucoup plus faible, permet aux tissus végétaux de garder une plus grande élasticité. Par contre, de la Roche (1979) a montré sur le Blé que l'augmentation de la teneur en acide linolénique n'est pas nécessaire pour obtenir des plantes ayant une grande tolérance au froid. De même, la résistance aux très basses températures du Robinier ne s'accompagne pas d'une modification du taux d'acide linolénique (Siminovitch *et al.*, 1975).

Les mécanismes de résistance au froid des espèces ligneuses peuvent être très différents de celui des espèces herbacées d'autant plus que les zones de température étudiées ne sont pas les mêmes. Nous travaillons dans une plage de température positive et ces auteurs ont fait leurs observations entre — 5 °C et — 196 °C. De même, de la Roche (1979) travaille entre — 6 °C et — 22 °C dans une autre zone de transition en ayant une température de substrat et de l'atmosphère ambiante uniforme.

Cette importante modification de la teneur en acide linolénique dans les racines ne s'accompagne pas de variations significatives du taux des autres acides pour la Laitue. Par contre, chez la Tomate, nous notons concomitamment une diminution importante du taux d'acide palmitique et un accroissement du pourcentage d'acide 15 méthylhexadécanoïque.

Le mécanisme exact par lequel les plantes accumulent l'acide linolénique dans les lipides n'est pas encore clair. Dans la Laitue, cette accumulation ne s'accompagne d'aucune modification significative de la teneur en lipides et du taux des autres acides gras. Aussi, est-il très difficile de savoir si cet acide est formé par désaturation de l'acide stéarique (C 18 : 0) avec les étapes intermédiaires de l'acide oléique (C 18 : 1 ω 9) et de l'acide linoléique (C 18 : 2 ω 6) comme le propose Harris et James (1969). La diminution du taux de ces trois acides est environ trois fois plus faible que l'augmentation du taux d'acide linolénique. Une autre voie de synthèse est possible par élongation de la chaîne de l'acide dodécatriénoïque (C 12 : 3 ω 3) (Harwood, 1975). Cette possibilité peut expliquer l'accumulation d'acide linolénique sans modification du taux d'acide stéarique, d'acide oléique et d'acide linoléique que nous notons dans les racines de Laitue et dans celles de Tomate.

L'augmentation de la teneur en acide 15 méthylhexadécanoïque est liée à une modification du métabolisme de la leucine dont il dérive (Hitchcock et Nichols, 1971). En effet, à basse température, cet acide s'accumule dans les racines parallèlement à une augmentation du taux de leucine (Cornillon, 1977).

De plus, nous notons chez la Tomate une accumulation de lipides totaux et un relèvement important du taux de désaturation des acides gras quand on compare la composition des racines provenant de plantes élevées à 12 °C par rapport à celles élevées à 22 °C. Grenier *et al.* (1972) ont observé une accumulation de lipides (phospholipides et triglycérides) dans les racines, les tiges et les feuilles de luzernes élevées au froid.

De même, Smolenska et Kuiper (1977) ont observé sur Colza une accumulation de lipides à 5 °C par rapport au témoin cultivé à 22 °C-25 °C. Cette accumulation se produit dans les racines et dans les feuilles pour les lipides neutres, les glycolipides et les phospholipides. Par contre, Wilson et Crawford (1974) ont relevé un abaissement de la teneur en lipides des plantes sensibles au gel tandis que les plantes résistantes ne

montraient aucune réaction quand elles étaient maintenues à 5 °C. Toutes ces expériences étaient conduites avec une température voisine pour la partie aérienne et les racines.

Le degré de désaturation augmente à faible température mais ce phénomène est beaucoup plus marqué pour la Tomate, contrairement aux observations de de Silva *et al.* (1975). Ces auteurs ont noté une désaturation des acides gras d'autant plus grande que les plantes étaient plus résistantes au froid. Par contre, Wilson et Crawford (1974) ne notent pas de différence dans le degré d'insaturation des plantes sensibles au froid et des plantes résistantes.

Conclusions

Au cours de cette étude, nous avons pu effectuer des observations concomitantes sur la croissance et le métabolisme des lipides sur deux espèces, la Laitue et la Tomate, la première résistante, la seconde sensible au froid. Ces observations nous conduisent à distinguer les phénomènes de résistance au froid, des possibilités de croissance à basse température.

En effet à 12 °C, le comportement de la Laitue reste presque normal par rapport aux plantes élevées à 22 °C, tandis que celui de la Tomate est fortement modifié. Cette différence de comportement à basse température se traduit par des modifications de la teneur en lipides d'autant plus importantes que la plante est plus sensible au froid. Mais il apparaît surtout, dans les racines de Tomate, une importante proportion d'acides gras à chaîne latérale qui ne se retrouve pas dans les racines de Laitue.

A 12 °C, la Laitue et la Tomate présentent un premier palier d'adaptation au froid qui se traduit par une forte synthèse d'acide linolénique. Cette augmentation de la teneur en cet acide tri-insaturé permet de garder une grande fluidité aux membranes.

La plus grande sensibilité au froid de la Tomate se traduit en outre par des modifications plus importantes dans la synthèse des lipides avec accumulation de lipides totaux et d'acide iso C 17 à chaîne latérale et aussi une moindre synthèse d'acide palmitique.

La connaissance des mécanismes qui conduisent à une croissance normale pour une température racinaire relativement basse devient particulièrement importante pour accroître la période de culture sans provoquer de dépenses énergétiques supplémentaires. Ainsi au printemps, la température des racines est un facteur qui limite sévèrement la croissance des plantes en région méditerranéenne.

Aussi nous paraît-il intéressant de poursuivre l'étude des relations entre une croissance normale à basse température et la distribution des acides gras dans les racines Le comportement des lipides dans les racines d'espèces dont l'adaptation au froid est différenciée permettra d'apporter des éléments de réponse à ce problème.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer les plus vifs remerciements à M. E. Jolivet (Laboratoire d'Etude du métabolisme intermédiaire et de nutrition minérale, I.N.R.A. Versailles et à M. Morizet (Station d'Agronomie, I.N.R.A. Clermont-Ferrand) pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à ce mémoire.

Summary

Influence of root temperature on the growth of Lettuce and Tomato

Lettuce and Tomato plants have been grown in nutrient solutions at a steady temperature of 12 °C and 22 °C at the root level.

When the root temperature is held at 12 °C, the growth of Lettuce remains normal whereas that of Tomato slows down.

These differences at low temperature correspond to changes in lipids content all the greater as the plant is sensitive to chilling injury. A 12 °C, both Lettuce and Tomato present a first hardening phase. This gives a high increase in linolenic acid synthesis which affords a great fluidity to the membranes. The Tomato which is the most sensitive to chilling synthesizes less palmitic acid and especially has a large amount of branched chain fatty acids which are in trace amount in Lettuce roots.

Zusammenfassung

Temperatur der Wurzeln und Fettsäure

Die Tomaten und Kopfsalate wurden in einer Nährlösung mit einem Wurzelumgebung-temperatur von 12 °C und 22 °C angelegt.

Bei einer 12 °C Temperature bleibt das Wachstum des Kopfsalats fast normal, dagegen, jenes der Tomate ist sehr stark gemindert.

Dieses unterschiedliche Verhalten bei tiefer Temperatur wird durch eine Änderung des Fettgehaltes ausgedrückt die je bedeutender ist desto Kälteempfindlicher die Pflanze ist.

Bei 12 °C zeigen der Kopfsalat und die Tomate eine erste Anpassungstufe zu Kälte die zur Folge eine bedeutende Synthese der eine große Plastizität der Membranen behaltende Linolensäure hat.

Die größere Empfindlichkeit der Tomate an der Kälte führt außerdem zu einer kleineren Produktion der Palmitinsäure und besonders synthetisiert die Tomate viele Fettsäure mit Seitenketten die in der Lattich wurzeln nicht sich vorfinden.

РЕЗЮМЕ

Влияние температуры корней на рост салата и томатов. Ее действие на их липидный состав.

КОРНИЙОН П., БУДОН М.

Растения салата и томатов культивировались на питательном растворе при постоянной температуре равной 22° и 12° на уровне корней.

При температуре корневой среды в 12° рост растений салата остается почти нормальным, в то время как рост томатов сильно задерживается.

Эта разница в поведении при низких температурах субстрата, выражается изменением содержания липидов, тем более крупным, чем более чувствительно растение к холоду. При температуре в 12° салат и томат находятся на первом уровне приспособления к холоду, выраженным усилением синтеза линоленовой кислоты, позволяющей мембранам сохранить достаточно жидкое состояние. Большая чувствительность томата к низким температурам приводит, кроме того, к уменьшению продукции иальминовой кислоты, что позволяет этому растению синтетизировать крупные количества жирных кислот с боковой цепью, которых нельзя было найти в корнях салата.

Références bibliographiques

CORNILLON P., 1974. Comportement de la Tomate en fonction de la température du substrat. *Ann. agron.*, **25,** 753-777.

CORNILLON P., 1977. Influence de la température du substrat sur la composition des racines et des limbes de Tomate. Implications concernant l'absorption hydrique. *Ann. agron.*, **28,** 277-289.

de la ROCHE I. A., 1979. Increase in linolenic acid is not a pre requisite for development of freezing tolerance in wheat. *Plant Physiol.*, **63,** 5-8.

de la ROCHE I. A., ANDREWS C. J., POMEROY M. K., WEINBERGER P., KATES M., 1972. Lipid changes in winter wheat seedlings (*Triticum aestivum*) at temperatures inducing cold hardiness. *Can. J. Bot.*, **50,** 2401-2409.

de SILVA N. S., WEINBERGER P., KATES M., de la ROCHE I. A., 1975. Comparative changes in hardiness and lipid composition in two near-isogenic lines of wheat (spring and winter) grown at 2 °C and 24 °C. *Can. J. Bot.*, **53,** 1899-1905.

FARKAS T., 1975. Effect of temperature upon linolenic acid level in Wheat and Rye seedlings. *Lipids*, **10,** 331-334.

GRENIER G., TREMOLIERES A., THERRIEN H. P., WILLEMOT C., 1972. Changements dans les lipides de la luzerne en conditions menant à l'endurcissement au froid. *Can. J. Bot.*, **50,** 1681-1689.

HARWOOD J. L., 1975. Fatty acid biosynthesis, p. 43-113. *Recent advances in the chemistry and biochemistry of plant lipids*. Ed. Galliard et Mercer, A. P. London.

HARRIS P., JAMES A. T., 1969. The effect of low temperature on fatty acid biosynthesis in plants. *Biochem. J.*, **112,** 325-330.

HITCHCOCK C., NICHOLS B. W., 1971. *Plant lipid biochemistry*, 304 p. Academic Press, London.

KRAMER P. J., 1969. *Plant and soil water relationship : A modern synthesis*. 390 p. McGraw Hill, New York.

LEROY A. M., FRANCOIS A., 1952. Le dosage des acides gras fixes et des substances insaponifiables des tissus végétaux. Etude de la composition de quelques aliments des animaux. *Ann. Zool.*, **1,** 51-59.

ST JOHN J. B., CHRISTIANSEN M. N., 1976. Inhibition of linolenic acid synthesis and modification of chilling resistance in cotton seedlings. *Plant Physiol.*, **57,** 257-259.

SIMINOVITCH D., SINGH J., de la ROCHE I. A., 1975. Studies on membranes in plants cells resistant to extreme freezing. I. Augmentation of phospholipids and membranes substance without changes in insaturation of fatty acids during hardening of Black Locust bark. *Cryobiology*, **12,** 144-153.

SMOLENSKA G., KUIPER P. J. C., 1977. Effect of low temperature upon lipid and fatty acid composition of roots and leaves of winter rape plants. *Physiol. Plant.*, **41,** 29-35.

WILLEMOT C., 1977. Simultaneous inhibitions of Linolenic acid synthesis in winter wheat roots and frost hardening by BASF 13-338 a derivative of Pyridazinone. *Plant Physiol.*, **60,** 1-4.

WILSON J. M., CRAWFORD R. M. M., 1974. Leaf fatty acid content in relation to hardening and chilling injury. *J. Exp. Bot.*, **25,** 121-131.

Ann. agron., 1979, **30** (5), 443-453.

Comparaison de l'utilisation par le maïs du phosphore des boues résiduaires ou du phosphate monocalcique pour différents niveaux de zinc et de fer dans le substrat

B. POMMEL

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Bordeaux, I.N.R.A.,
Domaine de la Grande Ferrade, 33140 Pont de la Maye

Résumé

Deux expérimentations ont été réalisées sur du Maïs semé en petits vases de végétation contenant 2 kg de sable et placés en serre. Deux sources de phosphore, le phosphate monocalcique et la boue résiduaire (digérée anaérobie, conditionnée par addition de polyélectrolytes puis centrifugée) ont été comparées, pour trois niveaux de zinc dans le substrat, en présence ou en l'absence de fer. On a mesuré la croissance des plantes et leur contenu en P, Fe, Zn.

La boue résiduaire étudiée a présenté, sur la base du phosphore prélevé par le Maïs, une efficacité égale à 70 p. 100 de celle du phosphate monocalcique. La boue a constitué une source de fer assimilable, jouant un rôle antichlorosant, mais elle a également immobilisé partiellement le fer apporté sous forme soluble. Le zinc de la boue est moins assimilable par la plante que le sulfate de zinc. La présence de fer limite l'absorption du zinc par la plante et réduit considérablement la toxicité du zinc absorbé. En conséquence, le rapport Zn/Fe dans la plante est un meilleur indicateur de toxicité que la seule teneur en Zn. Dans la pratique, on pourrait peut-être penser à utiliser cet antagonisme pour limiter l'absorption et l'utilisation de métaux toxiques par la plante.

1. — Introduction

L'épuration des eaux usées urbaines entraîne la fabrication d'un résidu boueux riche en matières facilement fermentescibles. Ces boues subissent habituellement un traitement de stabilisation, soit par fermentation aérobie, soit plus souvent par digestion anaérobie : ce dernier procédé est appliqué à la moitié des boues produites en France. Les boues subissent parfois un traitement de déshydratation en vue de diminuer leur volume ; cette opération s'effectue en lit de séchage ou par déshydratation mécanique après un conditionnement convenable.

La masse totale de boues résiduaires annuellement produite en France, rapportée à la matière sèche, s'élève à 550 000 t. Ce produit est éliminé par mise en décharge, incinération ou utilisation agricole. Cette dernière possibilité suppose que soient connus le contenu des boues en éléments agronomiquement intéressants, les variations de ce contenu et la disponibilité des éléments pour les végétaux (Pommel, 1979).

Les boues résiduaires des stations d'épuration des eaux usées urbaines ont généralement des teneurs élevées en azote et en acide phosphorique. Sommers (1977) donne comme valeurs moyennes de ces paramètres, respectivement : 3,9 p. 100 et 4,7 p. 100, rapportées à la matière sèche, et comme valeurs extrêmes de deux cent cinquante échantillons : < 0,1-17,6 p. 100 et < 0,1-14,3 p. 100. Selon le même auteur, le phosphore total se trouve à des teneurs relativement constantes dans des boues de diverses origines : 64 à 84 p. 100 de ce phosphore serait sous forme minérale (Sommers, Nelson et Yost, 1976). La fraction organique du phosphore total n'est cependant pas négligeable : elle atteindrait même 40 p. 100 dans les boues activées (Cosgrove, 1973). Les teneurs des boues au sortir d'une même station varient peu dans le temps en ce qui concerne le phosphore minéral et beaucoup en ce qui concerne le phosphore organique (Sommers, Nelson et Yost, 1976).

Toujours selon Sommers (1977), la teneur des boues en fer est en moyenne de 1,3 p. 100, mais elle varie de moins de 0,1 p. 100 à 15,3 p. 100 ; elle est considérablement élevée par l'emploi de chlorure ferrique comme agent de floculation des boues avant déshydratation ; l'aluminium (sous forme de sulfate d'alumine) et le calcium (sous forme de chaux) peuvent également être utilisés dans le traitement des boues ; leurs teneurs moyennes et leur amplitude de variation sont respectivement de 1,2 p. 100 (0,1-13,5) et 4,9 p. 100 (0,1-25) rapportées à la matière sèche. La concentration moyenne en zinc est de 2 790 ppm, mais elle varie entre 101 et 27 800 ppm.

Alors que la disponibilité pour les végétaux de l'azote des boues est maintenant relativement bien connue (King, 1973 ; Ryan, Keeney et Walsh, 1973 ; Furrer, 1977; Chaussod, 1978), peu d'études ont été consacrées au phosphore ; selon les indications de Gupta (1976), le phosphore apporté par des boues de déphosphatation, précipitées au chlorure ferrique, serait plus assimilable par le Ray-grass en milieu acide qu'en milieu neutre. Les expérimentations au champ apportent des résultats peu concordants : Hinesly, Jones et Ziegler (1973) observent une augmentation significative de la teneur en phosphore des parties végétatives du Maïs sur les parcelles ayant reçu des boues ; en revanche, King et Morris (1972) ne mettent pas en évidence d'effet significatif de l'application de boues sur la teneur en phosphore du Chiendent (*Cynodon dactylon* L. Pers.).

On pourrait invoquer plusieurs hypothèses pour rendre compte de la diversité des comportements du phosphore dans les sols.

Le phosphore minéral de la boue est, selon Gupta (1976), en grande partie adsorbé sur des hydroxydes de fer, d'aluminium ou de calcium ; la nature de la phase minérale à laquelle est lié le phosphore pourrait varier en fonction des modes de conditionnement subis par la boue, des pH de la boue et du sol...

Par ailleurs, beaucoup d'éléments métalliques (fer, zinc, nickel, cadmium) contenus dans les boues en quantité variable et sous des formes très diverses sont susceptibles d'exercer une action déterminante sur l'absorption et l'utilisation du phosphore par la plante. L'antagonisme P/Zn notamment est bien connu (Trocmé, 1975 ; Singh et Dartigues, 1970). Ainsi, au cours d'une expérience au champ, Juste et Solda (1977) constatent une diminution significative des teneurs en phosphore du Maïs sur les parcelles traitées avec des boues ; ces dernières ont pourtant reçu six fois plus de phosphore total que les parcelles témoin minéral et contiennent trois fois plus de phosphore extractible par la méthode Dyer : le phosphore ne serait donc pas bloqué dans le sol,

mais son absorption par la plante ou son transport dans les tissus végétaux serait freiné par des phénomènes d'antagonisme.

Dans le but de vérifier cette dernière hypothèse, on a effectué des expérimentations dont le principe consiste à utiliser le Maïs comme extractant biologique du phosphore apporté comparativement par les boues et par un engrais minéral soluble, ceci à différents niveaux de zinc et en présence ou en l'absence de fer. Ce dernier élément a été pris en compte dans l'établissement du protocole expérimental, au vu des interactions auxquelles il peut donner lieu avec le phosphore et le zinc au niveau de l'absorption par le Maïs (Prabhakaran Nair et Babu, 1975).

2. — Matériel et méthode

La boue étudiée provient d'une station d'épuration de la banlieue bordelaise où elle a subi une digestion anaérobie, suivie d'un conditionnement aux polyélectrolytes et d'une déshydratation par centrifugation ; sa composition est donnée dans le tableau 1. Cette boue a été séchée à 50 °C et broyée, afin de permettre un mélange intime avec le sable. Elle a été apportée dans des vases de végétation à une dose équivalant à 10 t/ha, rapportée à la matière sèche, ce qui n'est pas aberrant par rapport à la pratique agricole. Une telle quantité de boue contient en effet 280 kg d'azote total, soit environ 140 kg d'azote rapidement assimilable.

TABLEAU 1

Composition de la boue étudiée, rapportée à la matière sèche
Composition of the sewage sludge (dry matter basis)

Cendres p. 100	54,4
Carbone p. 100	29,2
Azote Kjeldahl p. 100	2,79
Phosphore total (P_2O_5) p. 100	4,89
Calcium p. 100	5,4
Magnésium p. 100	4,73
Fer p. 100	4,72
Cuivre ppm	309
Manganèse ppm	9 253
Zinc ppm	7 056
Cadmium ppm	33
Chrome ppm	74
Nickel ppm	246
Plomb ppm	1 313

Deux essais ont été effectués, comprenant chacun cinq traitements, ceux-ci étant répétés cinq fois :

— T, 0 Zn : Traitement témoin, dans lequel le phosphate monocalcique constitue la source de phosphore ; l'apport de cet élément est identique en quantité à celui effectué au moyen des boues ;

— B, 1 Zn : Traitement dans lequel la boue constitue la source de phosphore ;

— T, 1 Zn : Traitement témoin, auquel on a ajouté, sous forme de sulfate de zinc, une dose de ce métal équivalente à celle apportée au moyen de la boue ;

— B, 5 Zn : Traitement boue, auquel on a ajouté une dose quadruple de zinc ;
— T, 5 Zn : Traitement témoin, auquel on a ajouté une dose quintuple de zinc.

La seconde expérimentation se différencie de la première par l'application, sous forme de sulfate ferreux dans tous les traitements, d'une quantité de fer égale à celle apportée par la boue. Le sulfate ferreux, comme tous les autres composés, a été utilisé sous forme de poudre. Le tableau 2 récapitule les apports totaux en phosphore, zinc et fer effectués sur les différents traitements, au cours des deux essais.

TABLEAU 2

Apports totaux en acide phosphorique, fer et zinc par vase de végétation dans les différents traitements, et apports correspondants par hectare

Total phosphorus (P_2O_5), iron and zinc applied in pots for the different treatments and corresponding amounts by hectare

Traitements	Apport acide phosphorique		Apport de fer		Apport de zinc	
	Par pot en ppm de P_2O_5	en kg/ha P_2O_5	Par pot en ppm	en kg/ha	Par pot en ppm	en kg/ha
0 Fe, T, 0 Zn .	122	495	0	0	0	0
0 Fe, B, 1 Zn .	122	495	118	478	17	71
0 Fe, T, 1 Zn .	122	495	0	0	17	71
0 Fe, B, 5 Zn .	122	495	118	478	85	355
0 Fe, T, 5 Zn .	122	495	0	0	85	355
Fe, T, 0 Zn...	122	495	118	478	0	0
Fe, B, 1 Zn...	122	495	236	956	17	71
Fe, T, 1 Zn...	122	495	118	478	17	71
Fe, B, 5 Zn...	122	495	236	956	85	355
Fe, T, 5 Zn...	122	495	118	478	85	355

Le Maïs (variété I.N.R.A. 260) a été semé à raison de cinq graines par pot, dans des vases de végétation contenant 2 kg de sable, et placés en serre. La composition du sable utilisé comme substrat est donnée dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Caractéristiques principales du sable utilisé comme substrat

Main characteristics of the sand used in the experiments

Capacité d'échange meq p. 100	0,9
Matière organique p. 1 000	0,1
Azote Kjeldahl p. 100	0,06
Acide phosphorique total p. 100	0,02
Calcium échangeable p. 1 000	0,040
Fer total p. 100	0,11
Zinc total ppm	0,0

Azote et potassium ont été apportés dans tous les pots aux doses suivantes : pour l'azote, l'équivalent de 100 kg de N/ha/semaine, sous forme d'ammonitrate ; pour la potasse, de 100 kg/ha (K_2O) apportés en une seule fois, sous forme de sulfate de potassium. Le renouvellement hebdomadaire de l'apport d'azote est destiné à compenser un éventuel lessivage des couches superficielles lors des arrosages.

Les différences de pH entre vases de végétation ayant reçu des boues et vases témoins ont été atténuées par une application généralisée de carbonate de calcium, constituant un apport de calcium double de celui effectué par les boues. En fin d'expérimentation, le pH moyen des pots ayant reçu des boues était de 7,4 et celui des pots témoins de 6,8.

L'humidité a été maintenue dans chaque vase de végétation à un niveau voisin de la capacité de rétention, en évitant toute percolation.

Le Maïs a été récolté au stade cinq-six feuilles, après environ un mois de croissance. Les parties aériennes ont été pesées à l'état frais, puis après séchage. Elles ont été ensuite broyées et la poudre obtenue a été minéralisée par voie sèche pour permettre une détermination des teneurs en zinc et en fer par spectrophotométrie d'absorption atomique et en phosphore par colorimétrie du complexe phospho-molybdique réduit par l'acide ascorbique.

Sur le plan statistique, les résultats ont été traités par l'analyse de la variance, complétée par la méthode des contrastes ; dans la suite du texte, on utilisera la convention suivante : un résultat satisfaisant au seuil de confiance de 5 p. 100 sera dit significatif, au seuil de 1 p. 100 très significatif, au seuil de 1 p. 1 000 très hautement significatif.

3. — Résultats et discussion

Les observations effectuées sur les cultures permettent de constater les phénomènes suivants : tous les plants de maïs des traitements témoins en l'absence d'appli-

TABLEAU 4

Expérimentation n° 1. *Rendement et composition minérale des parties aériennes du Maïs poussé sur milieu non enrichi en fer. Sources de Phosphore : phosphate monocalcique (T), Boue (B)*

Experiment n^{r} 1. *Yield and composition of corn grown on medium without iron. Phosphorus sources : monocalcium phosphate (T), sludge (B)*

Niveau de zinc apporté	Traitement	Rendement en matière sèche (g/pot)	Indice de rendement p. 100 du témoin	Teneur du Maïs (s/mat. sèche)			Zn/Fe dans le Maïs
				P_2O_5 p. 1 000	Fer (ppm)	Zinc (ppm)	
0	0 Fe, T, 0 Zn	3,4	100	23,7	59	53	0,9
1	0 Fe, B, 1 Zn	4,5	132	2,9	60	56	0,9
1	0 Fe, T, 1 Zn	2,3	68	29,0	43	670	15,6
5	0 Fe, B, 5 Zn	2,6	76	3,4	81	2 160	26,7
5	0 Fe, T, 5 Zn	1,0	29	13,1	51	1 750	34,3

(Analyse statistique : se reporter au texte.)

cation de fer sont nettement chlorosés et leur rendement est très fortement diminué par l'apport de la forte dose de zinc. Au contraire, pour les traitements ayant reçu des boues, aucun signe de chlorose n'apparaît, la croissance est plus élevée et la toxicité du zinc ne se manifeste sur le rendement que de façon moins accusée.

En présence d'application de fer, tous les plants de maïs sont dans un état physiologique satisfaisant et la baisse de rendement provoquée par l'apport de la dose quintuple de zinc est limitée.

Les principaux résultats sont présentés dans les tableaux 4, 5, 6, 7 et 8. Pour la discussion, ils seront regroupés selon trois thèmes :

1) assimilabilité du phosphore de la boue ;
2) fourniture et immobilisation du fer par la boue ;
3) assimilabilité et toxicité du zinc.

TABLEAU 5

Expérimentation n° 2. *Rendement et composition minérale des parties aériennes du Maïs poussé sur milieu enrichi en fer. Sources de phosphore : phosphate monocalcique (T), Boue (B)*

Experiment n^{r} 2. *Yield and composition of corn grown on medium with iron. Phosphorus sources : monocalcium phosphate (T), sludge (B)*

Niveau de zinc apporté	Traitement	Rendement en matière sèche (g/pot)	Indice de rendement p. 100 du témoin	Teneur du Maïs (s/mat. sèche)			Zn/Fe dans le Maïs
				P_2O_5 p. 1 000	Fer (ppm)	Zinc (ppm)	
0	Fe, T, 0 Zn .	5,0	100	3,5	91	34	0,4
1	Fe, B, 1 Zn . .	4,2	84	2,9	66	74	1,1
1	Fe, T, 1 Zn . .	4,9	98	3,2	109	316	2,9
5	Fe, B, 5 Zn . .	3,7	74	3,0	83	1 416	17,1
5	Fe, T, 5 Zn . .	3,5	70	3,6	135	2 236	16,6

(Analyse statistique : se reporter au texte.)

TABLEAU 6

Quantité de phosphore (P_2O_5) *prélevée par le Maïs, en* mg/*pot* (apport : 244 mg/pot)

Phosphorus (P_2O_5) *uptake by corn,* mg/*pot* (supply : 244 mg/pot)

		0 Zn	1 Zn	5 Zn
0 Fe	T	80,6	66,7	13,1
	B		13,0	8,8
Fe	T	17,4	15,8	12,4
	B		12,5	11,3

TABLEAU 7

Quantité de fer prélevée par le Maïs, en mg/*pot*
Iron uptake by corn, mg/*pot*

		0 Zn	1 Zn	5 Zn
0 Fe	T	0,20	0,10	0,05
	B		0,27	0,21
Fe	T	0,45	0,53	0,47
	B		0,28	0,31

TABLEAU 8

Quantité de zinc prélevée par le Maïs, en mg/*pot* (apport : 0,34 et 170 mg/pot)
Zinc uptake by corn, mg/*pot* (supply : 0,34 and 170 mg/pot)

		0 Zn	1 Zn	5 Zn
0 Fe	T	0,18	1,54	1,75
	B		0,25	5,61
Fe	T	0,17	1,54	7,82
	B		0,31	5,24

3.1. — *Assimilabilité du phosphore de la boue*

La boue a constitué une source de phosphore moins facilement utilisable par la plante que le phosphate monocalcique ; en effet, les différences de rendement entre le traitement témoin Fe, T, 0 Zn et le traitement boue Fe, B, 1 Zn en présence d'une application de fer sont significatives, et les différences de teneur des maïs en phosphore sont très hautement significatives. Autrement dit, les différences entre les prélèvements de phosphore effectués par les plantes des traitements Fe, B, 1 Zn et Fe, T, 0 Zn sont très hautement significatives, les premiers se situant à 70 p. 100 des seconds.

Ce chiffre ne reflète pas uniquement une différence d'assimilabilité des formes du phosphore. En effet, le zinc contenu dans la boue a pu freiner l'absorption du phosphore par la plante ; une même quantité de ce métal ajoutée au traitement témoin Fe, T, 0 Zn provoque un effet de cette nature : le prélèvement de phosphore effectué par les plantes des traitements témoins ayant reçu une dose de zinc identique à celle contenue dans la boue n'est plus que 91 p. 100 de celui des traitements témoins sans zinc. On observe le même phénomène avec un apport quintuple de zinc : il y a dans tous les cas une diminution du phosphore prélevé concomitante de l'augmentation des apports de zinc (tabl. 6).

Dans les essais au champ où l'on observe un ralentissement de l'absorption du phosphore par le Maïs après un apport de boue (Juste et Solda, 1977), un effet de métaux tels que le cadmium, le nickel, le fer pourrait s'additionner à l'effet antagoniste du zinc sur l'absorption du phosphore.

3.2. — *Fourniture et immobilisation du fer par la boue*

L'essai effectué sans application de fer a permis de mettre en évidence un effet positif des boues sur le rendement, très hautement significatif. Les plantes croissant sur les pots témoins 0 Fe, T, 0 Zn ; 0 Fe, T, 1 Zn et 0 Fe, T, 5 Zn présentent toutes un aspect chlorotique accentué ; le diagnostic de la chlorose ferrique est confirmé par les différences considérables des teneurs en phosphore (Courpron et Juste, 1975) des traitements « boue » d'une part et des traitements témoins d'autre part, Les plantes du traitement témoin 0 Fe, T, 0 Zn ont accumulé le phosphore au point d'incorporer dans leurs parties aériennes un tiers de l'apport total de cet élément, sans qu'il y ait eu conjointement élaboration importante de matière sèche. A titre de comparaison, les plantes du traitement « boue » 0 Fe, B, 1 Zn n'ont prélevé que 5,3 p. 100 du phosphore apporté. L'apport de boues a donc joué un rôle antichlorosant manifeste, grâce au contenu de ce produit en fer assimilable.

De la même façon, l'apport de sulfate ferreux a joué un rôle antichlorosant, en accroissant la quantité de fer et en diminuant la quantité de phosphore prélevés et, ceci, de façon très significative.

Cependant, les boues possèdent également une capacité d'immobilisation du fer apporté sous forme de sulfate ferreux : l'analyse des résultats obtenus avec application de fer montre que les boues exercent un effet dépressif très hautement significatif sur la concentration en fer des plantes, ceci bien que les traitements avec boues aient reçu en tout deux fois plus de fer total que les traitements témoins ; le fer apporté sous forme soluble est sans doute partiellement chélaté par la matière organique de la boue. Il est possible également que le pH légèrement plus élevé des traitements avec boue puisse provoquer une plus grande immobilisation du fer.

3.3. — *Assimilabilité et toxicité du zinc*

L'analyse des résultats obtenus avec application de fer fait apparaître un effet dépressif très hautement significatif des boues sur la teneur en zinc des plantes. Le Maïs absorbe donc moins facilement le zinc contenu dans la boue que celui du sulfate de zinc.

Un phénomène analogue s'observe pour les résultats de l'essai effectué sans enrichissement en fer, pour une dose simple de zinc, entre les traitements « boue » 0 Fe, B, 1 Zn et témoin 0 Fe, T, 1 Zn ; en revanche, les plantes du traitement témoin ayant reçu une dose quintuple de zinc, 0 Fe, T, 5 Zn, ont absorbé une quantité de ce métal moindre que le traitement « boue » 0 Fe, B, 5 Zn, ce qui pourrait probablement s'expliquer par un ralentissement de l'absorption dû à un état physiologique extrêmement déficient ; la même remarque est aussi valable en ce qui concerne le phosphore.

La comparaison des teneurs en fer des plantes de l'essai effectué avec application de ce métal fait apparaître un effet du niveau de zinc hautement significatif : quand la quantité de zinc absorbée par la plante s'accroît dans des proportions très considérables, la quantité de fer absorbée augmente légèrement ; l'accroissement de l'absorption de fer pourrait, dans une certaine mesure, protéger la plante contre la toxicité du zinc. Ainsi, les maïs du traitement Fe, T, 1 Zn, qui ont reçu du fer, sont nettement moins affectés par la toxicité du zinc que les plantes du traitement 0 Fe, T, 1 Zn : teneur en

zinc moindre, teneur en fer plus élevée, rendement plus proche de celui du témoin sans zinc.

Dans le cas où le fer est abondamment disponible dans le milieu, des teneurs de 316 ppm de zinc dans les tissus du Maïs (traitement Fe, T, 1 Zn) n'ont pratiquement pas affecté le rendement ; avec plus de 2 000 ppm (traitement Fe, T, 5 Zn) celui-ci n'est diminué que de 30 p 100, et aucun symptôme de toxicité n'apparaît. Ces chiffres diffèrent largement de ceux obtenus par Takkar et Mann(1978) sur un sol limono-sableux, initialement déficient en zinc et fertilisé en azote, phosphore, potasse, sans apport d'oligo-éléments autres que le zinc à diverses doses. Ces auteurs observent que le rendement du Maïs commence à décroître pour des concentrations de zinc dans les tissus supérieures à 100 ppm, et se trouve divisé par trois pour une concentration de 300 ppm ; au-delà de 600 ppm, des symptômes de toxicité apparaissent. Les divergences entre ces observations s'expliquent très vraisemblablement par les différences de concentration des autres éléments métalliques dans le substrat et dans la plante.

La toxicité du zinc est donc plus à relier à la valeur du rapport Zn/Fe dans la plante qu'à la seule concentration du zinc : dans les conditions expérimentales présentes, les effets sur le rendement ne sont pas décelables pour des valeurs de ce rapport inférieures ou égales à 3 ; ils sont manifestes pour des valeurs égales ou supérieures à 15.

4. — Conclusion

Utilisée en vases de végétation, à une dose correspondant à la pratique agricole courante, la boue résiduaire étudiée (digérée anaérobie, conditionnée par addition de polyélectrolytes puis centrifugée) a présenté une efficacité égale à 70 p. 100 de celle du phosphate monocalcique pour l'alimentation phosphorique du Maïs pendant un mois. Au cours de l'expérimentation, la plante a incorporé dans ses parties aériennes, respectivement, 5,1 p. 100 et 7,1 p. 100 du phosphore apporté sous chacune de ces deux sources. Nous nous proposons maintenant d'étudier la cinétique de cette absorption de manière à faire varier la fraction prélevée du phosphore apporté.

Nous observerons également l'effet de doses d'apport variables. Il faut garder à l'esprit le fait que des boues ayant subi d'autres types de traitement auraient pu donner des résultats bien différents.

Cette étude montre également que les boues sont susceptibles d'apporter au végétal une certaine quantité de fer assimilable. Dans la mesure où cet élément s'y trouve partiellement sous forme chélatée par la matière organique, il serait intéressant de tester une éventuelle action antichlorosante de boues appliquées sur un sol chlorosant.

Le fer joue par ailleurs un rôle important dans la protection de la plante contre la toxicité du zinc et, peut-être, d'autres métaux lourds. On ne peut donc pas juger de la toxicité d'un métal contenu dans une boue en considérant l'effet potentiel de ce métal comme s'il était isolé, mais il faut, au contraire, tenir compte des autres éléments métalliques présents ; on peut d'ailleurs penser jouer sur leurs interactions pour diminuer la toxicité des boues. Il serait intéressant de vérifier si un apport de sulfate ferreux aux boues destinées à l'agriculture est susceptible de limiter l'absorption ou l'utilisation par les végétaux d'éléments métalliques toxiques présents dans la boue elle-même ou dans le sol auquel elle serait appliquée.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Remerciements

Nous tenons à remercier MM. C. Juste, G. Lefèvre et E. Triboï (respectivement Stations d'agronomie I.N.R.A. de Bordeaux, Amiens et Clermont-Ferrand) qui ont apporté leurs conseils à ce travail.

Summary

Sludge phosphorus utilization and Maize yield, at different Zn and Fe levels in medium

Two experiments have been carried out with Maize in pots filled with sand (2 kg) and placed in a greenhouse. Two P sources : monocalcium phosphate and sewage sludge (digested, polyelectrolyte floculated) were tested, at 2 Zn levels, with and without Fe. Yield and concentrations of P, Fe and Zn in plants were measured.

The studied sludge was 70 p. 100 as efficient as monocalcium phosphate for P uptake. Sludge was a source of available Fe and had an antichlorotic role, but it partially bound the brought soluble iron. Sludge Zn is less plant available than Zn sulfate. Fe decrease Zn absorption by plant and toxicity of absorbed Zn. Consequently, Zn/Fe ratio in plant is a better toxicity sign than Zn concentration alone. Practically, one might think to use this antagonism to try to limit absorption and utilization of heavy metals by plants.

Zusammenfassung

Vergleich der Benutzung durch Mais des Phosphors des Klärschlammes oder des monokalziumhaltigen Phosphats bei verschiedenen Zink- und Eisenstufen im Substrat

Es wurden zwei Experimente mit, in 2 kg Sand enthaltende kleine Pflanzenbehälter gesäten Mais, welche in ein Treibhaus untergebracht wurden, durchgeführt. Zwei Phosphorquellen, das monokalziumhaltige Phosphat und der Klärschlamm (Anaerobien digeriert, durch Zusatz von Polyelektrolyten konditionniert und sodann zentrifugiert) wurden bei drei Zinkstufen im Substrat, in Gegenwart oder in Abwesenheit von Eisen, verglichen. Es wurde das Wachstum der Pflanzen sowie deren Gehalt an P, Fe und Zn gemessen.

Auf Basis des vom Mais entnommenen Phosphors, wies der untersuchte Klärschlamm eine Wirksamkeit von 70 p. 100 von derjenigen des monokalziumhaltigen Phosphats auf. Der Klärschlamm hat eine assimilierbare Eisenquelle gebildet welche eine antichlorierende Rolle spielte, dieselbe hat jedoch auch das teilweise in löslicher Forme angebotene Eisen blockiert. Das Zink des Klärschlammes ist durch die Pflanze weniger assimilierbar als das Zinksulfat. Die Anwesenheit von Eisen schränkt die Aufnahme des Zinkes durch die Pflanze ein und mindert die Giftigkeit des aufgenommenen Zinkes. Deshalb ist das Verhältnis Zn/Fe in der Pflanze ein besserer Giftigkeitsanzeiger als nur einzig der Gehalt an Zn. Man könnte vielleicht überlegen in der Praxis diese Gegenwirkung zu nützen um die Aufnahme und die Ausnützung der giftigen Metalle einzuschränken.

РЕЗЮМЕ

Сравнительное изучение употребления кукурузой фосфора остаточной грязи и монофосфата кальция, при различных уровнях цинка и железа в субстрате.

ПОММЕЛВ Б.

Проводилось два опыта над кукурузой, посеянной в небольшие вегетационные сосуды, содержавшие 2 кг. песка и помещенные в теплицу. Сравнивались два источника фосфора : монофосфат кальция и остаточная грязь (вызревшая в анаеробных условиях, кондиционированная прибавлением полиэлектролитов с последующим центрифугированием), при трех уровнях цинка в субстрате и в присутствии, или отсутствии железа. Измерялись рост растений и содержание в них фосфора, цинка и железа.

На базе фосфора, поглощенного кукурузой, эффективность остаточной грязи представляла 70 р. 100 эффективности фосфата. Кроме того, грязь явилась хорошим источником

усвояемого железа, игравшим к тому-же противухлорозную роль, но и иммобилизировавшим вместе с тем частично железо, принесенное в растворенной форме. Цинк грязи менее легко усваивался растениями, чем сернокислая форма элемента. Присутствие железа ограничивало поглощение цинка растениями, но вместе с тем сильно уменьшало токсичность поглощенного цинка. Поэтому соотношение Zn/Fe в растении является лучшим показателем токсичности чем просто содержание цинка в нем. Применение этого антагонизма на практике было-бы может-быть возможным для ограничения поглощения и употребления токсичных металов растением.

Références bibliographiques

CHAUSSOD R., 1978. *Valeur fertilisante des boues résiduaires. Les problèmes liés à l'utilisation de l'azote.* Cycle Boues Résiduaires, 18-19-20 avril 1978, E.N.S.A.I.A. Nancy.

COSGROVE D. J., 1973. Inositol polyphosphates in activated sludges. *J. environ. Qual.*, **2,** 483-484.

COURPRON C., JUSTE C., 1975. Influence de l'incorporation de certaines formes de matières organiques sur le pouvoir chlorosant d'un sol calcaire. *Ann. agron.*, **26,** 215-227.

FURRER O. J., 1977. Der Düngerwert des Klärschlammes. Klärschlamm-Verwertung in der Landwirtschaft. *Schweig Landw. Technikum Zollikofen*, **24,** 3.

GUPTA S. K., 1976. *Phosphate removal in systems* H_2PO_4-γ-FeO(OH) *and* H_3PO_4-$FeCl_3$ *and characteristics of sludge phosphate.* Thesis, Faculty of Natural Sci., Univ. Berne, 138 p.

HINESLY T. D., JONES R. L., ZIEGLER E. L., 1973. Effects on corn by applications of heated anaerobically digested sludges. *Compost Sci.*, **13** (4), 26-30.

UISTE C., SOLDA P., 1977. Effets d'applications massives de boues de stations d'épuration en monoculture de Maïs : action sur le rendement et la composition des plantes et sur quelques caractéristiques du sol. *Sci. Sol*, 147-155.

KING L. D., 1973. Mineralization and gaseous loss of nitrogen in soil applied liquid sewage sludge. *J. environ. Qual.*, **2,** 356-358.

KING L. D., MORRIS H. D., 1972. Land disposal of liquid sewage sludge : The effect on yield, in vivo digestibility and chemical composition of coastal Bermudagrass (*Cynodon dactylon*). *J. Envir. Qual.*, **1,** 325-329.

POMMEL B., 1979. *La valorisation agricole de déchets* : 2. *Les Boues résiduaires urbaines.* I.N.R.A., Bordeaux, 70 p.

PRABHAKARAN NAIR K. P., BABU G. R., 1975. Zinc-Phosphorus-Iron interaction studies in Maize. *Plant Soil*, **42,** 517-536.

RYAN J. R., KEENEY D. R., WALSH L. M., 1973. Nitrogen transformations and availability of an anaerobically digested sewage sludge in soil. *J. environ. Qual.*, **2,** 489-492.

SINGH Y., DARTIGUES A., 1970. Efficiency of polyphosphates and orthophosphate in zinc-deficient soils. *Plant Soil*, **32,** 397-441.

SOMMERS L. E., 1977. Chemical composition of sewage sludge and analysis of their potential use as fertilizers. *J. Environ. Qual.*, **6,** 225-232.

SOMMERS L. E., NELSON D. W., YOST K. J., 1976. Variable nature of chemical composition of sewage sludges. *J. Environ. Qual.*, **5,** 303-306.

TAKKAR P. N., MANN M. S., 1978. Toxic levels of soil and plant zinc for Maize and Wheat. *Plant Soil*, **49,** 667-669.

TROCMÉ S., 1975. *Les carences minérales en France chez les plantes à destination fourragère* (*dont le Maïs*). 7e Journées d'Inform. du « Grenier de Theix », C.R.Z.V., Theix.

Ann. agron., 1979, **30** (5), 455-467.

Rationalisation des apports d'engrais en vergers par épandage en bandes

J. G. HUGUET (1), A. M. SAUGNAC (2) et P. DECOMBE (2)

(1) *Station d'agronomie,*
Centre de Recherches de Bordeaux, I.N.R.A.,
Domaine de la Grande Ferrade, Pont-de-la-Maye, 33140 Villenave d'Ornon

(2) *Chaire de Mathématiques appliquées, E.N.I.T.A.,*
Avenue Charles de Gaulle, 33170 Gradignan

Résumé

Les auteurs ont recherché, par un calcul théorique, la méthode d'épandage des engrais annuels la plus efficace, compte tenu des caractères de l'enracinement et des distances de plantation des arbres d'un verger.

Ils ont montré que, quelle que soit la liaison entre la densité des racines absorbantes et leur éloignement du tronc, la quantité de petites racines pratiquement concernées par un épandage d'engrais en bandes était finalement proportionnelle aux surfaces communes à ces bandes et aux projections sur le sol des volumes racinaires maxima supposés toujours cylindriques et axés sur les troncs.

Des tableaux sont proposés pour indiquer la largeur de bande d'épandage d'engrais la mieux adaptée au rayon maximum d'enracinement des arbres d'un verger à écartement donné. L'examen de ces tables conduit à préconiser des épandages en bandes discontinues dans le cas des jeunes vergers, surtout s'ils sont plantés au carré.

Introduction

En arboriculture fruitière, l'épandage localisé des engrais a toujours paru être la solution pour pallier les inconvénients évidents d'un épandage en plein quels que soient l'âge et la densité du verger. Or, chaque fois que l'on recherche un effet à court terme, l'efficacité dépend de la probabilité de rencontre rapide des éléments apportés avec la rhizosphère des arbres concernés. Cette probabilité est fonction, à la fois, de la technique de répartition de l'engrais et de l'occupation du terrain par les systèmes racinaires des arbres.

Logiquement, il doit exister, pour un peuplement donné, une technique d'épandage qui, adaptée à la situation du moment et à certaines contraintes pratiques, permette d'espérer la meilleure efficacité de l'apport.

Cette efficacité maximale correspond à la technique qui limite l'apport aux zones où la probabilité d'accès aux racines est la meilleure.

1. — Approche théorique de l'épandage optimum

1.1. — *Fonction d'enracinement*

L'étude de l'enracinement des arbres fruitiers par la méthode de la tranchée spirale (Huguet, 1973, 1976) permet de traduire la répartition racinaire d'un arbre sous la forme d'un certain nombre de données synthétiques. Cette traduction se fait au prix de quelques approximations, dont la première est de considérer que la répartition de l'enracinement est globalement symétrique par rapport au tronc. Ce postulat simplificateur est souvent faux pour la charpente racinaire, c'est-à-dire l'ensemble des grosses racines de diamètre supérieur ou égal à 1 mm. Mais, pratiquement, l'examen de nombreux enracinements permet de le juger acceptable en ce qui concerne le système absorbant, c'est-à-dire l'ensemble des petites racines de diamètre inférieur à 1 mm, seul système pris en considération dans le travail qui suit.

Une donnée essentielle de l'étude racinaire par la tranchée spirale est l'obtention de la relation qui lie le nombre de petites racines à leur distance du tronc. Cette « fonction racinaire » est du premier, du second ou du troisième degré et correspond donc au polynôme général :

$$y = a_0 + a_1 \rho + a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3$$

dans lequel y est le nombre moyen de petites racines observées par dm^2 de section verticale sur toute la profondeur du profil et à la distance ρ du tronc.

1.2. — *Fonction d'enracinement et épandage en bandes*

Pour éviter l'épandage en plein, la technique d'apport localisé la plus facile à réaliser pratiquement est un épandage en bandes parallèles aux lignes de plantation, pour lequel il existe déjà des matériels adaptés. Pour ce type d'épandage, le problème pratique est de déterminer la largeur et la position de la bande.

1.2.1. *Position de la bande.*

L'étude des enracinements et des fonctions correspondantes fait apparaître dans tous les cas que le système racinaire absorbant est d'autant plus dense que le point d'observation est plus proche du tronc. Cette constatation va à l'encontre d'une opinion répandue qui considère, par analogie avec le système aérien, que les formations fines sont d'autant plus denses qu'elles se situent davantage à la périphérie du système. Il en découle que, dans tous les cas, la bande d'épandage doit partir de la ligne de plantation afin de traiter cette zone d'enracinement dense.

L'épandage en bandes paraît particulièrement bien adapté aux vergers enherbés seulement sur les allées de roulement ; dans ce cas, les bandes desherbées ont un rôle privilégié dans l'alimentation minérale des arbres (Atkinson, 1977 ; Delver, 1979).

1.2.2. *Largeur de la bande.*

Pour tout arbre, il existe un cercle dont le tronc est le centre et sous lequel s'inscrit tout le système racinaire. Le rayon R de ce cercle va notamment dépendre de l'âge de

l'arbre et peut se définir comme le rayon maximum d'extension racinaire (fig. 1). Il est bien évident que si la bande d'épandage a une largeur L égale à R, tout le système racinaire sera concerné, mais il est certainement possible de pourvoir très correctement aux besoins minéraux d'un arbre avec les bandes d'une largeur inférieure à R.

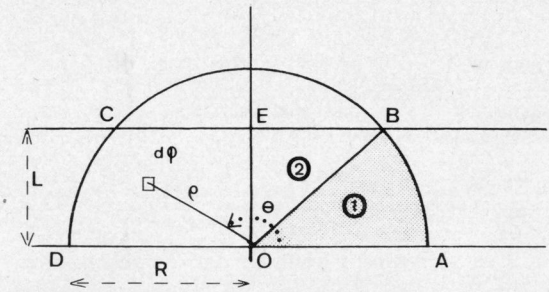


FIG. 1. — *Calcul de la proportion de racines concernées par un épandage en bande.*
Calculation of the proportion of roots concerned by strip placement.

En effet, il est admis que l'approvisionnement minéral d'une plante peut être assuré par une partie seulement du système racinaire. Il a même été prouvé qu'un apport minéral localisé dans une fraction du volume de sol exploité par les racines est plus efficace qu'uniformément réparti dans la totalité de ce volume (de Wit, 1953 ; Maertens, 1978) ; il paraît donc logique de choisir une largeur de bande telle qu'elle concerne principalement les zones à forte densité racinaire en évitant l'épandage sur les zones où cette densité est trop faible.

Le problème qui se pose alors est de connaître comment varie la proportion des racines concernées par rapport au nombre total de racines, suivant la largeur de la bande d'épandage.

1.3. — *Calcul de la proportion de racines concernées par un épandage en bande* (fig. 1)

Dans un cas donné, l'enracinement est défini par la fonction d'enracinement :

$$\text{densité racinaire} = f(\rho) = a_0 + a_1 0 + a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3$$

soit :

L cm, largeur de la bande d'épandage,
R cm, le rayon maximum d'extension racinaire,
ρ cm, la distance par rapport au tronc d'une portion élémentaire de surface $\delta\varphi$,
P, le pourcentage de racines concernées par un épandage,

$$P = \frac{\text{nombre de racines dans la zone ABEO} \times 100}{\text{nombre de racines dans le quart de cercle de rayon R}} = \frac{N_1}{N_2} \times 100,$$

$N_1 =$ nombre de racines dans ABO + nombre de racines dans BEO

$N_1 = \varphi_1 + \varphi_2$

La quantité de racines existant dans une zone élémentaire $d\varphi$ est

$$f(\rho).\rho.d\rho.d\theta$$

d'où

$$\varphi_1 = \int_0^{\text{arc sin } L/R} \int_0^{R} f(\rho).\rho.d\rho.d\theta$$

$$\varphi_2 = \int_{\text{arc sin } L/R}^{\pi/2} \int_0^{L/\sin\theta} f(\rho).\rho.d\rho.d\theta$$

par intégrations successives par rapport à ρ puis à θ il apparaît :

$$\varphi_1 = \left(\frac{a_0}{2} R^2 + \frac{a_1}{3} R^3 + \frac{a_2}{4} R^4 + \frac{a_3}{5} R^5\right) \times \text{arc sin } \frac{L}{R}.$$

Pour le calcul de N_2, il est nécessaire d'utiliser la variable intermédiaire

$$t = \text{tg } \frac{\theta}{2}$$

par intégrations successives par rapport à ρ et à θ il apparaît :

$$\varphi_2 = \left[\frac{a_0}{4} L^2\left(-\frac{1}{t} + t\right) + \frac{a_1}{12} L^3\left(-\frac{1}{2t^2} + 2 \text{ Log } t + \frac{t^2}{2}\right)\right.$$

$$+ \frac{a_2}{32} L^4\left(-\frac{1}{3t^3} - \frac{3}{t} + 3t + \frac{t^3}{3}\right)$$

$$\left. + \frac{a_3}{80} L^5\left(-\frac{1}{4t^4} - \frac{2}{t^2} + 6 \text{ Log } t + 2t^2 + \frac{t^4}{4}\right)\right]$$

expression calculée entre : $t = \text{tg } \frac{1}{2}\left(\text{arc sin } \frac{L}{R}\right)$ et $t = 1$, égale à 0 pour $t = 1$ ($\theta = 90^o$).

Pour N_2, même calcul que pour φ_1, seules les bornes changent : elles deviennent 0 et $\pi/2$ d'où :

$$N_2 = \left(\frac{a_0}{2} R^2 + \frac{a_1}{3} R^3 + \frac{a_2}{4} R^4 + \frac{a_3}{5} R^5\right) \times \frac{\pi}{2}.$$

1.4. — *Conséquences*

Un programme d'ordinateur a été rédigé pour calculer sur ces bases la proportion de racines concernées en fonction de la largeur de la bande d'épandage dans diverses situations pour lesquelles les fonctions d'enracinement avaient été déterminées. Dans tous les cas, il est apparu qu'aux erreurs d'arrondi près les proportions calculées étaient identiques au simple rapport des surfaces correspondantes, soit :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\text{surface OABE}}{\text{surface du quart de cercle de rayon R}}$$

c'est-à-dire que tous se passe comme si la proportion de racines concernées était indé-

pendante de la variation de la densité racinaire et dépendait seulement des valeurs relatives de R et de L.

Ce résultat est d'une grande importance pratique car la détermination de R est d'un accès beaucoup plus facile que la recherche de la fonction d'enracinement qui nécessite la réalisation de plusieurs tranchées, l'enregistrement et le dépouillement des données racinaires correspondantes.

Pour un peuplement donné, il apparaît donc que la proportion des racines concernées par un épandage en bande de largeur L peut se calculer simplement à partir de trois paramètres :

l_1 : distance entre rangs,
l_2 : distance sur le rang,
R : rayon maximum d'extension racinaire.

2. — Géométrie de l'épandage en bande dans un peuplement

La géométrie simplifiée d'un peuplement pérenne peut se résumer en deux situations :

— le verger est jeune, ou les écartements très grands, le diamètre maximum d'extension racinaire est inférieur aux distances l_1 et l_2 : les systèmes racinaires d'arbres voisins ne se rejoignent pas (fig. 2A) ;

— le verger est âgé, ou la distance l_2 entre arbres du même rang est faible, les systèmes racinaires des arbres voisins sont susceptibles de s'interpénétrer (fig. 2B).

Dans les deux cas, la situation du peuplement se déduit de l'étude du « motif élémentaire » rectangulaire de côtés l_2 et $l_1/2$ dans lequel on considère l'enracinement de l'arbre dont le tronc est situé au milieu du côté l_2.

Avec une bande d'épandage de largeur L inférieur à R, il apparaît quatre zones dans le motif (fig. 2A) :

— zone 1 : c'est la zone d'efficacité de l'épandage puisque c'est l'intersection de la bande d'épandage et du demi-cercle d'enracinement,

— zone 2 : zone où l'épandage est inutilisable car les racines de l'arbre n'explorent pas cette région.

— zone 3 : zone dans laquelle il existe des racines mais que la bande d'épandage n'atteint pas,

— zone 4 : zone à la fois en dehors de la bande d'épandage et de l'enracinement.

A partir de ces définitions, il est possible de calculer les rapports entre ces différentes zones lorsque la largeur de la bande d'épandage augmente jusqu'à $l_1/2$ (épandage en plein).

2.1. — *Proportion de racines concernées par l'épandage* : P p. 100

Figure 2A :

$$\text{P p. 100} = \frac{(\text{surface de la zone 1}) \times 100}{\text{surface du demi-cercle de rayon R}}$$

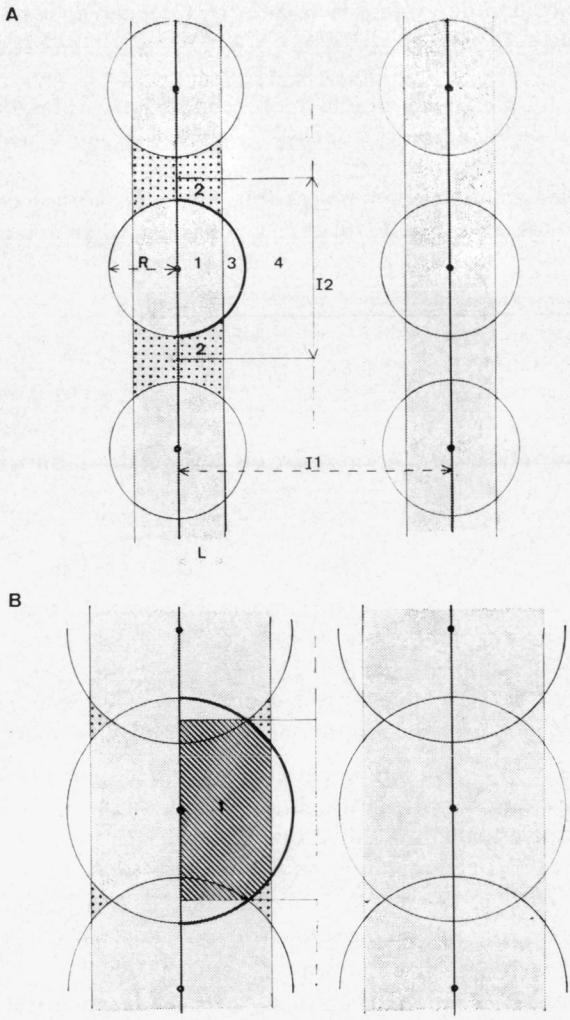


FIG. 2. — *Géométrie schématique de l'épandage en bandes en vergers.*
Simplified geometry of strip placement in orchards.

Figure 2B : Dans ce cas où il y a mélange des systémes racinaires d'arbres proches, il a été admis de ne pas tenir compte de cette interpénétration et de définir P de façon à considérer uniquement ce qui se passe dans le motif élémentaire :

$$P \text{ p. } 100 = \frac{(\text{surface de la zone 1}) \times 100)}{I_2 \times L} .$$

2.2. — *Proportion d'épandage inutilisable* : E p. 100

Tout épandage à l'extérieur de la zone d'exploitation racinaire est considéré comme inutilisable immédiatement. Cela ne veut pas dire que les apports sur les zones

d'exploration racinaire sont considérés comme entièrement utilisables. Mais il paraît logique d'améliorer l'efficacité en évitant en premier lieu les apports là où la probabilité d'absorption par le peuplement paraît nulle,

$$E \text{ p. } 100 = \frac{(\text{somme des surfaces } 2) \times 100}{I_2 \times L}.$$

Le calcul reste le même dans les deux cas de figure.

3. — Résultats

3.1. — *Exemple particulier*

Il est alors possible, pour un peuplement donné et défini par ses trois paramètres (I_1, I_2, R), de calculer P et E en fonction de largeurs croissantes de la bande d'épandage. Le graphique de la figure 3 donne les résultats de ces calculs. Pour rester dans des conditions compatibles avec la pratique, la largeur de 50 cm a été choisie comme largeur minimale d'épandage et le pas de progression de cette largeur fixé à 25 cm.

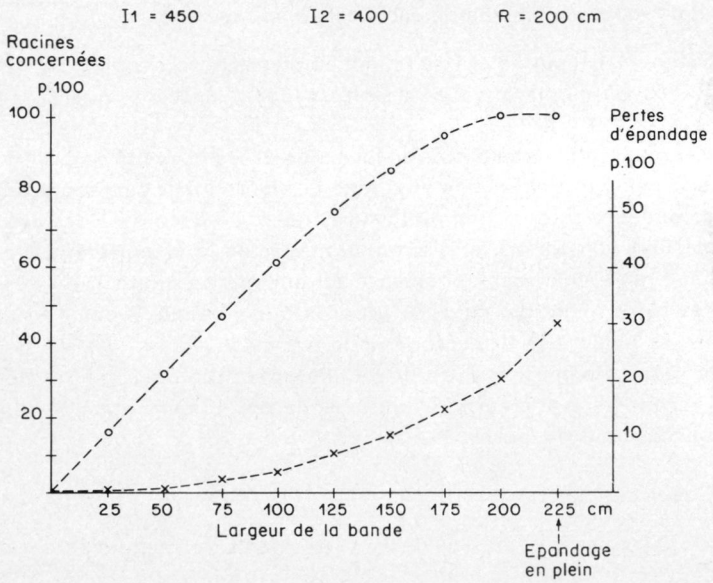


FIG. 3. — *Efficacité d'un apport en fonction de la largeur de la bande d'épandage* :
$I_1 = 450$ $I_2 = 400$, $R = 200$ cm.
Supply efficiency in relation to the width of the placement strip.
×------× Pertes d'épandage (Placement losses). o------o Racines concernées (concerned roots).

Dans le cas de l'exemple étudié, il apparaît que l'épandage en plein conduit à plus de 30 p. 100 d'épandage inutile. Une bande d'épandage de 200 cm, si elle permet d'espérer toucher l'ensemble du système racinaire des arbres, entraîne encore une perte d'épandage de plus de 20 p. 100. Par contre, avec une largeur d'épandage de 125 cm,

74 p. 100 du système racinaire est concerné tandis que les pertes sont réduites à moins de 7 p. 100.

Dans les conditions de ce peuplement, il semble donc que cette largeur de 125 cm soit un compromis raisonnable entre le souhait de toucher le plus possible de racines et le désir de limiter les épandages inutiles. Ce compromis est obligatoirement approximatif car il n'existe pas de référence expérimentale permettant de juger quelle proportion de racines il faut nécessairement atteindre pour obtenir une alimentation correcte du peuplement. Mais en première approche, il paraît raisonnable de vouloir toucher plus de la moitié du système racinaire (d'où au moins 60 p. 100) et limiter les pertes à l'épandage à moins de 15 p. 100. Des études complémentaires sont indispensables pour corriger par l'expérimentation ces premières estimations.

3.2. — *Choix pratique des caractéristiques d'un épandage en bandes*

Puisque, au regard de l'objectif recherché, trois paramètres suffisent à définir un peuplement, il paraît utile de proposer aux praticiens des éléments qui leur permettraient, à partir des paramètres propres de leur verger, d'établir les conditions d'application les mieux adaptées à leur cas.

3.2.1. *Calcul du rayon maximum pratique d'extension racinaire.*

Si les distances de plantation sont immédiatement accessibles, la définition du paramètre R : rayon maximum d'extension racinaire, nécessite quelques opérations préalables.

Pratiquement, il suffit de se placer en face d'un arbre et de faire partir du milieu de l'interligne une petite tranchée (une vingtaine de cm de large sur approximativement 60 cm de profondeur) en direction de l'arbre choisi. Le décompte des petites racines (diamètre inférieur ou égal à 1 mm) se fait à mesure de la progression. Il faut considérer que la limite de l'enracinement efficace est atteinte au moment où le seuil de dix petites racines sur le front de ranchée (approximativement 12 dm^2) est dépassé. La distance entre ce point et le tronc donne une première approximation de R : rayon maximum pratique d'extension racinaire. Cette opération doit être répétée plusieurs fois dans le verger (trois à cinq fois), la moyenne des valeurs obtenues donnera une estimation satisfaisante du paramètre R.

3.2.2. *Utilisation des tables.*

Pour l'établissement du tableau 1, tous les calculs permettant la construction du graphique de la figure 3 ont été faits pour chaque cas particulier défini par les valeurs des trois paramètres caractéristiques (I_1, I_2, R). Bien entendu, il n'était pas question de présenter l'ensemble de ces données. Dans le tableau 1, apparaissent, dans la plage correspondant à un peuplement, les seules données qui semblaient avoir un intérêt pratique évident. Soit, du haut vers le bas :

— première largeur de la bande d'épandage qui permet de concerner plus de 60 p. 100 des racines,

— proportion de racines concernées par un épandage de cette largeur,

— pertes d'épandage correspondant à cette largeur de bande,

— pertes d'épandage si le peuplement recevait un apport en plein.

Certaines constatations se dégagent de la lecture du tableau 1 : pour un rayon d'enracinement donné, les pertes d'épandage augmentent fortement à mesure que les écartements de plantation grandissent. Pour s'en tenir à une largeur d'épandage qui concerne plus de 60 p. 100 de l'enracinement, il existe un seuil des écartements de plantation au-dessus duquel il faudrait supporter, avec apport continu sur la bande, des pertes d'épandage qui dépasseraient un seuil tolérable (10 à 15 p. 100). En effet, plus les écartements sont grands et plus les pertes d'épandage seront fortes, et cela d'autant plus que les arbres sont plus jeunes, donc le rayon d'enracinement maximum (R) plus faible. Ainsi pour R = 75 cm, avec des écartements de 350 × 200, il faut une bande

TABLEAU 1

Table des largeurs d'épandage adaptées à l'enracinement d'un peuplement donné (densité 1900 à 550 arbres/ha)

Table of the placement strips widthes adjusted to the roots distribution of a given orchard (550 ⩽ number of trees/ha ⩽ 1900)

Distances : cm Entre rangs l_1 → (Alley width l_1) sur le rang l_2 (distances between 2 trees l_2) →			350					400						450					
			150	200	250	300	350	150	200	250	300	350	400	150	200	250	300	350	400
		a)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	75	*b*)	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
		c)	8	31	45	54	61	8	31	45	54	61	66	8	31	45	54	61	66
		d)	(66)	(74)	(80)	(83)	(86)	(71)	(78)	(82)	(85)	(87)	(89)	(74)	(80)	(84)	(87)	(89)	(90)
		a)	75	75	50	50	50	75	75	50	50	50	50	75	75	50	50	50	50
R cm		*b*)	86	86	61	61	61	86	86	61	61	61	61	86	86	61	61	61	61
Rayon	100	*c*)	1	10	24	36	45	1	10	24	36	45	52	1	10	24	36	45	52
pratique maximum		*d*)	(49)	(55)	(64)	(70)	(74)	(55)	(61)	(69)	(74)	(78)	(80)	(60)	(65)	(72)	(77)	(80)	(83)
d'extension		*a*)	100	100	100	75	75	100	100	75	75	75	75	100	100	75	75	75	75
racinaire	125	*b*)	88	88	88	72	72	88	88	72	72	72	72	88	88	72	72	72	72
(R cm)		*c*)	0	3	12	23	33	0	3	6	23	33	42	0	3	6	23	33	42
(Practical maximum		*d*)	(33)	(37)	(44)	(53)	(60)	(42)	(45)	(51)	(59)	(65)	(69)	(48)	(51)	(56)	(64)	(69)	(73)
radius		*a*)	150	150	100	100	100	125	125	100	100	75	75	125	125	125	100	75	75
of roots	150	*b*)	100	100	78	78	78	87	87	78	78	61	61	87	87	87	78	61	61
extension)		*c*)	4	8	1	8	21	0	1	1	8	18	28	0	1	5	8	18	28
		d)	(18)	(21)	(26)	(33)	(42)	(28)	(31)	(35)	(41)	(50)	(56)	(36)	(39)	(42)	(48)	(55)	(61)
		a)		150	150	150	125	150	150	150	150	125	100	150	150	150	150	125	100
	175	*b*)		92	92	92	82	92	92	92	92	82	69	92	92	92	92	82	69
		c)		0	2	7	9	0	0	2	7	9	18	0	0	2	7	9	18
		d)		(6)	(9)	(14)	(21)	(15)	(18)	(21)	(25)	(31)	(40)	(25)	(27)	(30)	(33)	(40)	(47)
		a)							175	175	175	150	125	175	175	175	175	150	125
	200	*b*)							92	92	92	85	74	92	92	92	92	85	74
		c)							0	1	4	4	7	0	0	1	4	4	7
		d)							(4)	(7)	(10)	(15)	(22)	(13)	(15)	(17)	(20)	(24)	(30)

a) L cm : largeur de la bande d'épandage (width of the placement strip).
b) P p. 100 : racines concernées par l'épandage (roots concerned by the placement).
c) E p. 100 : engrais inutilisable (unitilizable fertilizer).
d) E p. 100 : engrais inutilisable dans le cas d'un épandage en plein (unitilizable fertilizer in case of broadcasting).

d'épandage de 50 cm de large pour toucher 78 p. 100 de l'enracinement du peuplement. Mais un épandage continu tout au long de cette bande conduit à des pertes d'épandage de 31 p. 100.

Ce problème est encore plus aigu lorsqu'il s'agit de plantation au carré avec des écartements importants. Le tableau 2, établi sur les mêmes principes de calcul et de présentation que le tableau 1, montre l'importance intolérable des pertes d'épandage avec apport continu en bande. Ce même tableau 2 montre aussi l'énorme proportion de pertes lorsque l'épandage est réalisé en plein, sur un jeune verger à grand écartement.

TABLEAU 2

Table des pertes d'épandage avec apport en bandes ininterrompues
Supply losses with placement by continuous strip
(*Plantation au carré*) (square spacing)
Densités 490 *à* 200 *arbres/ha* (200 ⩽ number of trees/ha ⩽ 490)

Distance de plantation $l_1 = l_2$ cm Specing distances $l_1 = l_2$		450	500	550	600	650	700
R cm Rayon pratique maximum d'extension racinaire (R cm) (Practical maximum radius of roots extension)	*a*)...	50	50	50	50	50	50
	75 *b*)...	78	78	78	78	78	78
	c) ..	69	72	75	77	79	80
	d)...	(91)	(93)	(94)	(95)	(96)	(96)
	a)...	75	75	75	75	75	75
	125 *b*)...	72	72	72	72	72	72
	c) ..	48	53	57	61	63	67
	d)...	(76)	(80)	(84)	(86)	(88)	(90)
	a)...	100	100	100	100	100	100
	b)...	69	69	69	69	69	69
	175 *c*) ..	27	34	40	43	49	53
	d)...	(53)	(61)	(68)	(73)	(77)	(80)
	a)...	150	125	125	125	125	125
	225 *b*)...	78	67	67	67	67	67
	c) ..	8	15	23	29	35	38
	d)...	(22)	(36)	(47)	(56)	(62)	(68)
				200	150	150	150
	275			84	66	66	66
				10	13	20	26
				(22)	(34)	(44)	(52)
						200	175
	325					73	65
						7	12
						(22)	(32)

a) L cm : largeur de la bande d'épandage (width of the placement strip).
b) P p. 100 : racines concernées par l'épandage (roots concerned by the placement).
c) E p. 100 : engrais inutilisable (unitilizable fertilizer).
d) E p. 100 : engrais inutilisable dans le cas d'un épandage en plein (unitilizable fertilizer in case of broadcasting).

3.3. — *Epandage en bandes discontinues*

Il apparaît donc que, sur un peuplement jeune, l'épandage en bandes conduit encore à des pertes excessives ; la solution pratique est d'envisager un épandage en bandes discontinues, c'est-à-dire d'interrompre l'apport à l'extérieur des zones d'enracinement.

Sur le plan de la géométrie, l'interruption d'épandage sur une certaine longueur de bande entre deux arbres ramène à l'étude de l'épandage continu sur un nouveau peuplement théorique dont la distance l_2 (intervalle entre deux arbres sur la ligne) est diminuée d'une longueur égale à celle de l'interruption de bande.

Par exemple, pour le peuplement réel : $l_1 = 400$, $l_2 = 350$, $R = 125$ (tabl. 1), une interruption de bande de 150 cm entre deux arbres ramène au cas du peuplement $l_1 = 400$, $l_2 = 200$, $R = 125$, ce qui réduit les pertes d'épandage de 33 p. 100 à 3 p. 100.

D'une façon générale, pour limiter le plus possible les pertes d'épandage sur un jeune peuplement, il suffit que la longueur effective d'épandage, répartie symétriquement par rapport à l'arbre, soit égale à 2 R. De cette manière, les pertes d'épandage demeurent toujours inférieures à 5 p. 100.

Le problème technique de la distribution séquentielle ne devrait pas être un obstacle à l'utilisation de cette méthode car de nombreux dispositifs mécaniques ou optiques sont capables de commander l'épandage par référence aux positions relatives de l'épandeur et des troncs.

4. — Conclusions

La présente note a tenté d'analyser les conséquences géométriques d'un apport superficiel d'engrais, localisé en bandes, suivant les caractéristiques réelles d'un verger.

Cette réflexion était le préalable nécessaire à toute expérimentation sur la question ; les premiers résultats théoriques ont cependant paru avoir suffisamment d'implications pratiques pour qu'il soit utile d'en faire état.

Cependant, plusieurs points méritent d'être précisés : en premier lieu, la nature et le rôle des engrais épandables par cette technique. Celle-ci concerne uniquement les engrais dont on attend un effet à court terme. Il s'agit donc des engrais épandus chaque année en une ou plusieurs fois. Cette technique d'épandage est donc particulièrement conseillée pour la fertilisation azotée ; mais, suivant les caractéristiques physico-chimiques de la parcelle, elle peut tout aussi bien s'appliquer aux apports de potassium dans les sols sableux où le lessivage rapide de cet élément est à craindre, comme aux apports annuels de phosphore dans les sols calcaires où les fortes fumures de fond, avant plantation, sont déconseillées.

Il est aussi possible de s'interroger sur les effets, à long terme, d'un épandage limité à une partie seulement du système racinaire. Mais il ne faut pas perdre de vue que cette méthode recherche l'adaptation de l'épandage aux conditions réelles du verger et nécessite donc une participation attentive de l'arboriculteur qui doit, chaque hiver, déterminer la valeur du rayon maximum pratique d'extension racinaire pour en

déduire les conditions de la première application de l'année et, plus particulièrement, la largeur de la bande d'épandage. De plus, il paraît opportun d'augmenter systématiquement de 25 cm cette largeur dans le cas d'une seconde application annuelle, de façon à tenir compte de la croissance probable du système racinaire au cours de la période qui a séparé les deux épandages en créant ainsi des conditions favorables à cette croissance sans trop exagérer les pertes d'épandage.

Enfin, à propos de ces pertes d'épandage, il faut bien se rendre compte qu'il s'agit d'une image très optimiste de l'efficacité réelle de l'application. En effet, pour que les pertes d'épandage définies dans cette étude conditionnent l'efficacité réelle, il faudrait envisager que tout l'engrais apporté sur les zones explorées par l'enracinement pénètre, à court terme, dans les arbres... ce qui est loin d'être vrai. Lorsque les pertes d'épandage sont de 15 p. 100 par exemple, cela veut simplement dire que la probabilité de pénétration rapide dans les arbres de 15 p. 100 de l'engrais épandu est pratiquement nulle et non pas que 85 p. 100 de cet engrais pénétrera à court terme dans le peuplement.

Ces considérations préliminaires étant admises, l'épandage en bandes permet d'envisager de sérieuses économies d'engrais. En effet, dans un peuplement où une certaine quantité annuelle, épandue en plein, donne satisfaction, il est possible de calculer à l'aide des tables le gain d'efficacité obtenu par un épandage en bandes et de diminuer d'autant l'apport si la méthode est appliquée.

Ainsi dans le verger (l_1 : 400 ; l_2 : 250 ; R : 125) (tabl. 1), l'épandage en plein conduit à 51 p. 100 de pertes ; avec un épandage en bandes continues de 75 cm de large, ces pertes sont réduites à 6 p. 100. La dose habituelle peut donc être diminuée de 48 p. 100 (au lieu de mettre 100 avec 51 p. 100 de pertes, il suffit de mettre 52 avec 6 p. 100 de pertes).

Bien qu'il soit indispensable de tester expérimentalement ces conclusions, elles paraissent suffisamment étayées pour qu'il soit possible, en s'appuyant sur quelques données facilement accessibles, d'ajuster plus rationnellement les techniques d'épandage des engrais aux conditions réelles d'un peuplement.

L'épandage en bandes continues ou discontinues, en limitant l'apport à une fraction des zones d'activité racinaire du peuplement, permet d'envisager, surtout sur jeunes vergers, de sérieuses économies de produits sans perte d'efficacité tout en réduisant les apports inutiles potentiellement polluants.

Summary

Rationalizing strip fertilization of orchards

The authors have sought, through theoretical calculation, the more efficient method for yearly spreading of fertilizers, taking into account the rooting features and planting distance of orchard trees.

They show that, whatever the relationship between the density of sucking roots and their distance from the stem, the number of rootlets potentially affected by strip fertilization was ultimately proportional to the areas common to these strips and to the projections on the ground of the larger root volumes assumed to be always cylindrical and co-axial to the stems.

Charts are set forth to show the more suitable fertilizing strip width for the greatest rooting radius of orchard trees planted at a given planting distance.

Looking through these charts conduces to advocating fertilizing immature orchards in discontinuous strips especially when planted in squares.

Zusammenfassung

Rationalisierung des Düngerangebots in Obstgärten durch Ausstreuen in Streifen

Die Verfasser haben, durch eine theoretische Berechnung versucht die wirksamste Ausstreumethode des jährlichen Düngers, unter Berücksichtigung der Verwurzlungsarten und der Entfernungen zwischen den Bäumen eines Obstgartens, zu ermitteln.

Es wird dargelegt, welches auch die Dichte der aufnehmenden Wurzeln und deren Entfernung vom Stamme sei, dass die Menge der praktisch vom Ausstreuen des Düngers in Streifen betroffenen kleinen Wurzeln, schliesslich im Verhältnis steht zur gemeinsamen Fläche dieser Streifen und den Projektionen auf den Boden der maximalen Wurzelvolumen, welche stets zylindrisch und auf den Stamm als Achse bezogen angenommen sind.

Es werden Tabellen vorgeschlagen für die Angabe der bestangepassten Breite der Ausstreustreifen in Bezug auf den maximalen Einwurzelungsradius der Bäume eines Obstgartens mit gegebener Entfernung derselben voneinander. Die Uberprufung dieser Tabellen führt zur Empfehlung, bei neuen Obstgärten, hauptsächlich mit in Viereckstellung angepflanzten Bäumen, das Ausstreuen in unterbrochenen Streifen vorzunehmen.

РЕЗЮМЕ

Рационализация метода ленточного разбрасывания удобрений при их внесении в сады.

ХЮГЕ Ж. Г., СОНЬЯК А. М., ДЕКОМБ П.

С помощью теоритического рассчета делается попытка найти наиболее эффективный способ разбрасывания удобрений во фруктовом саду, в зависимости от характера укоренения деревьев и расстояний их посадки.

Доказывается, что какая-бы ни сушествовала связь между плотностью всасывающих корней и их отдаленностью от ствола, количество затронутых ленточным разбрасыванием удобрений кореньков, в конце концов пропорционально общей поверхности лент и отображению на почве максимальных корневых об'емов направленных к стволам и форма которых предполагается во всех случаях цилиндрической.

Предлагаются таблицы показывающие ширину лент разбрасывания удобрений, наиболее подходящих для максимального радиуса укоренения деревьев фруктового сада, с данной шириной интервалов посадки. В результате изучения этих таблиц рекоммендуется, в случае молодых садов, разбрасывание удобрений методом прерывистых лент, особенно если посадки проведены квадратом.

Références bibliographiques

ATKINSON D., 1977. Some observations on the root growth of young apple trees and their uptake of nutrients when grown in herbicided strips in grassed orchards. *Plant and Soil*, **49**, 459-471.

DELVER P., 1979. Uptake of nutrients by trees grown in herbicided strips. I.S.H.S., *Conf. on Mineral nutrition and fruit quality of temperate zone fruit trees.*

HUGUET J. G., 1973. Nouvelle méthode d'étude de l'enracinement des végétaux pérennes à partir d'une tranchée spirale. *Ann. agron.*, **24**, 707-731.

HUGUET J. G., 1976. Influence d'une irrigation localisée sur l'enracinement de jeunes pommiers. *Ann. agron.*, **27**, 343-361.

MAERTENS C., 1978. Possibilités d'absorption des éléments minéraux par les racines. Conséquences sur la localisation. *Sci. du Sol*, 185-195.

de WIT C. T., 1953. A physical theory on placement of fertilizers. *Agric. Research Report*, Wageningen, **59**, 1-71.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent aire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 3-1980

Dépôt légal : 1er trimestre 1980. N° d'impression : 26907

CPPAP n° 26017

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1979	France Prix T.T.C.	Étranger Prix Net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix Net
ANNALES AGRONOMIQUES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 6 nos par an	320 F	352 F	77 F	77 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOLOGIE - ÉCOLOGIE ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	250 F	276 F	77 F	77 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET DE SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	284 F	314 F	100 F	100 F
ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE, 6 nos par an (1)	335 F	370 F	72 F	72 F

(1) Les abonnements aux *Annales de Biologie animale, Biochimie, Biophysique* doivent être adressés à : « Secrétariat des A. B. A. B. B., I. N. R. A., 78350 JOUY-EN-JOSAS ».

APIDOLOGIE, 4 nos par an — Abonnement : France : 80 F — Étranger sauf R. F. A. : 130 F
— Le numéro : France : 25 F — Étranger sauf R. F. A. : 40 F

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne, Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... 230,00 F

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud, par **le Groupe de Recherches, I.N.R.A.-E.N.S.S.A.A.**
192 p., 1978 ..... 55,00 F

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... 300,00 F

Les Rongeurs de France. Faunistique et Biologie, par **H. Le Louarn** et **M.-C. Saint-Girons.**
164 p., 1977 ..... 80,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Privas N-19 et notice explicative, par **M. Bornand, J.-P. Legros, J. Moinereau.**
254 p. et une carte, 1977 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Dijon O-12 et notice explicative, par **J. Chrétien.**
218 p. et une carte, 1977 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Condon H-21 et notice explicative, par **J. Séguy.**
152 p. et une carte, 1975 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Angoulême H-16 et notice explicative, par **G. Callot.**
171 p. et une carte, 1975 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Moulins L-14 et notice explicative, par **J. C. Favrot.**
177 p. et une carte, 1974 ..... 60,00 F

Carte pédologique de France à 1/100 000. Toulon P-23 et notice explicative, par **J. Portier.**
107 p. et une carte, 1974 ..... 60,00 F

Journées d'information sur l'alimentation azotée des animaux, Paris, 21-22 novembre 1973.
141 p., 1974 ..... 27,00 F

L'I. N. R. A. au service des Industries agricoles et alimentaires. Inventaire des Recherches.
266 p., 1974 ..... 38,00 F

Symposium international sur la conservation des grains récoltés humides, Paris, 5-10 mars 1973.
762 p., 1973 ..... 168,50 F

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français, par **R. Cousin.**
111 p. et 140 fiches, 1974 ..... 168,50 F

Contribution à l'étude de la Faune de France. Systématique de la tribu des Scymnini (Coccinellidae), par **J. M. Gourreau.**
223 p., 1974 ..... 95,50 F

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Augé, P. Allemand, R. Hamès.**
144 p., 1973 ..... 63,50 F

Colloque sur l'ovogenèse et la folliculogenèse, Nouzilly, 14-16 déc. 1972.
258 p., 1973 ..... 134,50 F

Protoplastes et fusion de cellules somatiques végétales, Versailles, 11-15 septembre 1972. Coédition I.N.R.A.-C.N.R.S.
549 p., 1973 ..... 173,00 F

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Ann. agron., 1979, **30** (5), 387-467.

Table des matières

J. GUÉRIF, A. FAURE. — Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. I. — Etude statistique 387

Geneviève FAURIE, R. BARDIN. — La volatilisation de l'ammoniac. II. — Influence des facteurs climatiques et du couvert végétal 401

Ph. MALET. — Liaison statistique entre le développement et la croissance chez les plantes : Application d'un modèle simplifié à l'analyse de la croissance 415

P. CORNILLON, M. BOUDON. — Influence de la température des racines sur la croissance des laitues et des tomates. Incidence sur leur composition lipidique 431

B. POMMEL. — Comparaison de l'utilisation par le Maïs du phosphore des boues résiduaires ou du phosphate monocalcique pour différents niveaux de zinc et de fer dans le substrat 443

J. G. HUGUET, A. M. SAUGNAC, P. DECOMBE. — Rationalisation des apports d'engrais en vergers par épandage en bandes 455

Contents

J. GUÉRIF, A. FAURE. — Influence of organic matter on the mechanical behaviour of soils during compaction. I. — Statistical study 387

Geneviève FAURIE, R. BARDIN. — Volatilization of ammonia. II. — Influence of climatic factors and plant cover 401

Ph. MALET. — Statistical relationship between plant development and growth : a simplified model for analysing growth 415

P. CORNILLON, M. BOUDON. — Influence of root temperature on the growth of Lettuce and Tomato 431

B. POMMEL. — Sludge phosphorus utilisation and Maize yield, at different Zn and Fe levels in medium 443

J. G. HUGUET, A. M. SAUGNAC, P. DECOMBE. — Rationalizing strip fertilization of orchards.. 455

Les Annales agronomiques figurent dans current contents

I. N. 9.036.005.5

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 6

inra

AAG
30.6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
Ann. agron. ANAGA9 30 (6) 469-584 (1979)
FR ISSN 0003-3839.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

149, rue de Grenelle, 75007 PARIS, Tél. : 551-41-09.

Directeur général : J. POLY

Annales agronomiques.

— L. GACHON, Chef du Département d'Agronomie, 63100 Clermont-Ferrand.
— P. CHARTIER, Chef du Département de Bioclimatologie, C. N. R. A., 78000 Versailles.
— J. MAMY, Chef du Département de Science du Sol, C. N. R. A., 78000 Versailles.

Annales de l'Amélioration des Plantes.

— M. RIVES, Chef du Département de Génétique et d'Amélioration des Plantes, I. N. R. A., 11, rue Jean-Nicot, 75007 Paris.

Annales de Phytopathologie.

— A. COLÉNO, Chef du Département de Pathologie végétale, I. N. A., Paris Cedex 75231

Annales de Zootechnie.

— A. RÉRAT, Chef du Département de Nutrition, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Annales de Technologie agricole.

— P. DUPUY, Chef du Département de Technologie des Produits végétaux, 21034 Dijon Cedex.
— A. GUILBOT, Directeur de la Station de Biochimie et Physico-Chimie des céréales et de leurs dérivés C. E. R. D. I. A., le Noyer Lambert, 91300 Massy.
— B. L. DUMONT, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la Viande, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— A. BOURDET, Directeur du Laboratoire de Recherches sur la qualité des Blés, I. N. R. A., 16, rue Nicolas-Fortin, 75013 Paris.

Annales des Sciences forestières.

— P. BOUVAREL, Inspecteur général de la Recherche agronomique, Chef du Département de Recherches forestières, C. N. R. F., 54280 Seichamps.
— J. PARDÉ, Directeur de la Station de Sylviculture et de Production, C. N. R. F., 54280 Seichamps.

Annales de Génétique et de Sélection animale.

— P. MÉRAT, Directeur de la Station de Génétique factorielle, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.
— F. GROSCLAUDE, Chef du Département de Génétique animale, C. N. R. Z., 78350 Jouy-en-Josas.

Apidologie (Revue franco-allemande, co-édition I. N. R. A.-Deutscher-Imkerbund).

— J. LOUVEAUX, Directeur de la Station de Recherches sur l'Abeille et les Insectes sociaux, 91440 Bures-sur-Yvette.

Annales de Recherches vétérinaires.

— J. ASSO, Station de Virologie, Immunologie, Route de Thiverval, 78850 Thiverval-Grignon.

Reproduction, Nutrition, Développement. Administration et secrétariat de la Rédaction à l'adresse suivante: C. N. R. Z. 78350 Jouy-en-Josas.

— Ch. THIBAULT.
— L. GUÉGUEN.
— G. PÉTRISSANT.

ADMINISTRATION ET SECRÉTARIAT DE LA RÉDACTION

Service des Publications de l'I. N. R. A., route de Saint-Cyr, 78000 VERSAILLES. Tél. (3) 950-75-22

annales agronomiques

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON
Centre de GRIGNON
GEOLOGIE - PEDOLOGIE
Bibliothèque
N°

Bimestriel

1979

Vol. 30. N° 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1979, **30** (6), 469-584.

Table des matières

J. GUÉRIF. — Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage. II. — Matières organiques libres et liées 469

P. CHASSIN. — Détermination de l'angle de contact acides humiques-solutions aqueuses de diols. Conséquences sur l'importance relative des mécanismes de destruction des agrégats .. 481

M. K. RAZZAGHE, M. ROBERT. — Géochimie des éléments majeurs des micas en milieu organique : mécanismes de l'altération des silicates 493

B. MARY, J. C. RÉMY. — Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture. I. — Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée 513

Martine OLLIVIER, P. MALET. — Un modèle d'action des techniques culturales sur le blé. I. — Principe et premiers résultats sur une variété cultivée dans un domaine expérimental 529

Suzanne MÉRIAUX, H. ROLLIN, P. RUTTEN. — Effets de la sécheresse sur la vigne. I. — Etudes sur Cabernet-Sauvignon 553

Chronique des livres 577

Table des matières de l'année 1979 581

Contents

J. GUÉRIF. — Influence of organic matter on the mechanical behaviour of soils during compaction. II. — Free and bound organic matter 469

P. CHASSIN. — Determination of the angle of contact of humic acids-diols solutions. Consequences on the mechanisms of aggregate destruction 481

M. K. RAZZAGHE, M. ROBERT. — Geochemistry of the major elements of micas in organic medium : mechanism of silicates weathering 493

B. MARY, J. C. RÉMY. — Evaluation of the nitrogen availability of some arable soils. I. — Signification of kinetics of soil organic matter mineralization 513

Martine OLLIVIER, P. MALET. — A model of the response of wheat to agrotechnical factors. I. — Principle and first results for a cultivar grown in experimental fields 529

Suzanne MÉRIAUX. H. ROLLIN, P. RUTTEN. — Effects of drought on the vine. I. — Studies on Cabernet-Sauvignon 553

Books review 577

Contents of year 1979 583

Les Annales agronomiques figurent dans Current Contents

I.N. 9-036-006-5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

PÉRIODIQUES

TARIF DES ABONNEMENTS POUR 1980	France Prix T.T.C.	Étranger Prix net	LE NUMÉRO France Prix T.T.C.	LE NUMÉRO Étranger Prix net
ANNALES AGRONOMIQUES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE ZOOTECHNIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DES SCIENCES FORESTIÈRES, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
ANNALES DE RECHERCHES VÉTÉRINAIRES, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE PHYTOPATHOLOGIE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE GÉNÉTIQUE ET SÉLECTION ANIMALE, 4 nos par an	312 F	345 F	110 F	110 F
ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE, 4 nos par an	275 F	303 F	84 F	84 F
APIDOLOGIE, 4 nos par an	100 F	175 F (sauf RFA)	30 F	50 F (sauf RFA)
* ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE				
** ANNALES DE ZOOLOGIE, ÉCOLOGIE ANIMALE				

* Les Annales de Biologie animale, Biochimie Biophysique deviennent : « Reproduction, Nutrition, Développement ».
** Les Annales de Zoologie, Ecologie animale cessent avec le n° 4, volume 11, 1979.
Les articles publiés dans cette série paraîtront désormais dans les *Œcologia, Applicata* de la revue : *Acta Œcologia*.
Pour ces 2 revues s'adresser à C.D.R. Gauthier-Villars, BP 119, 93104 MONTREUIL CEDEX. Tél. (1) 374.12.45.

DERNIERS OUVRAGES PARUS

Utilisation par les ruminants des pâturages d'altitude et parcours méditerranéens. Xes Journées du Grenier de Theix.
576 p., 1979 ..... **110,00 F**

La Forêt et la Ville. Essai sur la forêt dans l'environnement urbain et industriel.
252 p., 1979 ..... **50,00 F**

Alimentation des ruminants. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants. Besoins alimentaires des animaux et valeur nutritive des aliments.
600 p., 1978 ..... **140,00 F**

Introduction à la statistique en biologie par **S. C. Pearce,** traduction de **J. P. Doazan.**
260 p., 1978 ..... **25,00 F**

L'I.N.R.A., l'eau et la production agricole
270 p., 1978 ..... **50,00 F**

Génétique et Amélioration de la Vigne. 2e Symposium international sur l'amélioration de la vigne. Bordeaux, 14-18 juin 1977.
472 p., 1978 ..... **230,00 F**

Pays, Paysans, Paysages dans les Vosges du Sud par le Groupe de Recherches I.N.R.A.-E.N.S. S.A.A.
192 p., 1978 ..... **55,00 F**

Flore illustrée des Phanérogames de Guadeloupe et de la Martinique, par **J. Fournet.**
1652 p., 1978 ..... **300,00 F**

Les Rongeurs de France, faunistique et biologie, par **H. Le Louarn** et **M. C. Saint Girons.**
164 p., 1977 ..... **80,00 F**

La Vache laitière. IXes Journées du Grenier de Theix.
342 p., 1977 ..... **60,00 F**

Amélioration génétique des animaux de ferme. Application aux bovins (sous la Direction de **B. Vissac**).
160 p., 1977 ..... **35,00 F**

Carte pédologique de la France à 1/1.000.000 par **J. Dupuis** ..... **96,00 F**

Cartes pédologiques de France à 1/100.000 ..... **96,00 F**
(Vichy, Perpignan, Angoulême, Brives, Dijon, Toulon, Moulins, Condom, Tonnerre, Privas, St-Dié, Lesparre). (chacune)

Le Pois. Etude génétique des caractères, classification, caractéristiques variétales portant sur les variétés inscrites au catalogue officiel français par **R. Cousin.**
111 p., et 140 fiches, 1974 ..... **168,50 F**

Les arbres et arbrisseaux acclimatés en région méditerranéenne française. Catalogue commenté, par **P. Auge, P. Allemand, R. Hames.**
144 p., 1973 ..... **63,50 F**

Les demandes d'abonnements et les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut National de la Recherche Agronomique, route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications de l'I. N. R. A., par virement postal à son compte courant : 9064-43 Paris, sans mentionner d'adresse, ou par bons U. N. E. S. C. O.
Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie JOUVE, 17, rue du Louvre, 75001 Paris. — 4-1980

Dépôt légal : 2e trimestre 1980. N° d'impression : 26959

CPPAP n° 1426 ADEP

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire* : il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de ... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le(s) nom(s) de(s) auteur(s) suivi(s) des initiales du (des) prénom(s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHARTIER (Bioclimatologie) ou M. MAMY (Science du Sol), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

AGRONOMIE.

Agnès HUBERT, R. CALVET. — The measurement of diffusion coefficients of solutes in porous media saturated with water 233

J. G. HUGUET, A. M. SAUGNAC, P. DECOMBE. — Rationalizing strip fertilization of orchards. 455

J. LE RENARD. — Description of a method for determining the coefficient of longitudinal hydrodynamic dispersion, in an homogeneous saturated porous medium. II. — Application of a mathematical model with three parameters one of which is phenomenological 109

Ph. MALET. — Statistical relationship between plant development and growth : a simplified model for analysing growth 415

B. MARY, J. C. RÉMY. — Evaluation of the nitrogen availability of some arable soils. I. — Signification of kinetics of soil organic matter mineralization 513

J. R. MARTY, A. HILAIRE. — First observations on the effects obtained by introducing soya bean in cereal crop rotations 191

Suzanne MERIAUX, H. ROLLIN, P. RUTTEN. — Effects of drought on the vine. I. — Studies on Cabernet-Sauvignon 553

Martine OLLIVIER, P. MALET. — A model of the response of wheat to agrotechnical factors. I. — Principle and first results for a cultivar grown in experimental fields 529

A. PERRIER, M. HALLAIRE. — Ratio between calculated potential evapotranspiration and pan-evaporation. I. — Justification of an experimental relation set in tropical zone 329

A. PERRIER, M. HALLAIRE. — Ratio between calculated potential evapotranspiration and pan-evaporation. II. — Expression as a function of an equilibrium factor between evaporating surfaces and air 337

B. POMMEL. — Sludge phosphorus utilisation and maize yield, at different Zn and Fe levels in medium 443

M. K. RAZZAGHE, M. ROBERT. — Geochemistry of the major elements of micas in organic medium : mechanism of silicates weathering 493

Ch. RIOU, J. P. LAGOUARDE, R. CHARTIER. — Evaporation from bare soil in semi-arid country during the cold season. Relations with albedo and soil surface temperature 347

Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Effects of pesticides on mineralization of soil organic nitrogen, nitrification and cellulose degradation 265

P. STENGEL. — Evaluation of textural and structural porosities : interest for the characterization of the physical state of soils 27

P. VACHIER, P. CAMBIER, R. PROST. — Structure of a porous medium : the chalk 247

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME. — Radiation laws in diffusing medium applied to plant canopy. II. — Crop trapping solar energy 1

Books review 105, 213, 577

Ann. agron., 1979, **30** (6), 583-584.

CONTENTS OF YEAR 1979

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, D. MASSIMINO, J. P. VIVOLI, Ch. RICHAUD. — The $C_2$3A laboratory. A tool for the study of whole plant physiology. I. — The growth chambers and the associated measuring systems 139

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, J. MASSIMINO, D. MASSIMINO, Ch. RICHAUD. — The $C_2$3A laboratory. A tool for the study of whole plant physiology. II. — Possibilities of the mini-informatic and first results 153

Ph. BUSSIÈRES. — Influence of characteristics of limestone particles on their carbonic solubility .. 121

P. CHASSIN. — Determination of the angle of contact of humic acids-diols solutions. Consequences on the mechanisms of aggregate destruction 481

Laurette COMBE. — Growth and dry matter distribution responses of radish plants to different levels of irradiance and carbon dioxide concentration 217

A. P. CONESA, H. METTAUER, R. HAEFLINGER, R. TRENDEL, Y. TUAL, P. GROSS. — Productivity of sugar beets in Alsace : a predicative model of the yields 281

P. CORNILLON, M. BOUDON. — Influence of root temperature on the growth of Lettuce and Tomato 431

J. DECAU, J. R. MARTY. — Utilization of fertilizer nitrogen by fodder sorghum 89

J. DECAU, G. DUTHEN, B. PUJOL. — After-effect of nitrogen fertilizers on the economic, energetic and nitrogen balance of subsequent crops fertilization. Theoretical analysis of the problem and observed experimental date 305

J. DEJOU, J. GUYOT, J. TRICHET. — An example of a beginning weathering on basic rocks in humid temperate region. Case of dioritic gabbros of the Jordanne high valley (Cantal) 63

J. E. DELPHIN, A. Ph. CONÉSA. — Evolution of the soil organic matter in an experiment of rotation, irrigation and crop residues manuring in the Hardt plain. I. — Level of the organic reserves 167

J. E. DELPHIN, A. Ph. CONÉSA. — Evolution of the soil organic matter in an experiment of rotation, irrigation and crop residues manuring in the Hardt plain. II. — Humic balance ... 179

J. E. DUFEY, C. M. PETIT, Y. GOBLET, H. LAUDELOUT. — Modelization of physico-chemical equilibrium of exchange and precipitation in soil-water-electrolyte systems 53

C. DUTHION. — Reducing ability of cultivated plant roots and how a short period of excess water modifies it 323

Geneviève FAURIE, R. BARDIN. — Volatilization of ammonia. I. — Influence of the nature of soil and nitrogen compounds 363

Geneviève FAURIE, R. BARDIN. — Volatilization of ammonia. II. — Influence of climatic factors and plant cover 401

J. GUÉRIF, A. FAURE. — Influence of organic matter on the mechanical behaviour of soils during compaction. I. — Statistical study 387

J. GUÉRIF. — Influence of organic matter on the mechanical behaviour of soils during compaction. II. — Free and bound organic matter 469

Ann. agron., 1979, **30** (6), 469-480.

Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage

II. — Matières organiques libres et liées

J. GUÉRIF

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches d'Avignon, I.N.R.A.,
Domaine Saint-Paul, 84140 Montfavet

Résumé

L'influence des matières organiques sur le comportement au compactage des sols est étudiée par test Proctor, en distinguant la fraction libre de la fraction liée.

La matière organique libre provoque une diminution de la compacité du matériau soumis au test, par effet stérique, mais aussi par les capacités de relaxation qu'elle confère au matériau si ses propriétés mécaniques le permettent. Ceci s'accompagne de modifications des seuils hydriques de changement d'état du matériau : limite de plasticité et limite de liquidité.

La matière organique liée provoque des modifications des propriétés rhéologiques de la phase argile que l'on pourrait traduire par des mesures des variations du gonflement, de la cohésion et de l'angle de frottement interne du matériau.

Introduction

Une précédente étude à partir de matériaux naturels nous a permis de montrer (Guérif et Faure, 1979) le poids déterminant de la matière organique sur le comportement des sols au compactage (test Proctor) et plus particulièrement sur les seuils hydriques de changement d'état et le degré de compacité.

Si les seuils hydriques de changement d'état dépendent essentiellement du comportement de la phase argile (teneur, propriétés rhéologiques), le degré de compacité dépend de l'interaction entre cette phase argile et le squelette (granulométrie, rugosité, ...) (Faure, 1978 ; Fiès, 1978). C'est à ces différents niveaux que la matière organique perturbe les phénomènes de compactage. Mais on ne peut analyser son action tant qu'on la caractérise d'une façon aveugle par une teneur en carbone. En effet, la matière organique est une fraction composite qui recouvre un ensemble de constituants différents par leurs origines et leur degré d'évolution, et dont la taille, la structure, les propriétés chimiques et la localisation sont à l'origine de phénomènes modifiant le comportement global des sols au compactage. Par exemple :

— des débris organiques peu évolués perturbent aussi bien l'arrangement des grains du squelette que celui des éléments structuraux ;

— le complexe argilo-humique n'a certainement pas les mêmes propriétés rhéologiques que l'argile minérale seule.

Nous avons donc choisi, en première approche, de distinguer la matière organique liée de la matière organique libre telles qu'elles sont définies par Hénin et Turc (1949) et Monnier *et al.* (1962).

Afin de comprendre un peu mieux l'action des matières organiques, nous avons tenté d'apprécier les sens et intensités respectifs des modifications du comportement au compactage d'un matériau minéral particulièrement sensible apportées par l'incorporation de différentes matières organiques. Celles-ci n'ont pas été choisies comme des modèles de matières organiques naturelles, mais comme des inducteurs de comportements variés.

1. — Matériel et méthodes

1.1. — *Symboles*

A	Teneur en argile en p. 100.	
e	Indice des vides $e = \frac{\bar{\gamma}s}{\bar{\gamma}d} - 1$	(sans dimension).
e_c	Indice des vides sous charge.	
M.O.	Teneur en matière organique en p. 100 de terre séchée à 105 °C.	
W	Teneur en eau en p. 100.	
W_c	Seuil hydrique de sensibilité au compactage. = limite de plasticité à 6 kg cm/cm³ en p. 100.	
W_m	Teneur en eau au maximum de compacité = limite de liquidité à 6 kg cm/cm³ en p. 100.	
W_a	Limite de plasticité de l'argile pure en p. 100.	
$\bar{\gamma}s$	Densité de solide	(sans dimension).
$\bar{\gamma}d$	Densité de l'éprouvette	(sans dimension).

1.2. — *Matériau minéral*

Dans toutes les expériences, nous avons utilisé un mélange binaire contenant 15 p. 100 de Kaolinite (voir tabl. 1) et 85 p. 100 de sable (voir tabl. 2). Ce mélange sera désigné par le symbole FLK 15.

TABLEAU 1

Caractéristiques de la Kaolinite
Kaolinite characteristics

Densité de solide $\bar{\gamma}s$	2,62
Surface spécifique	30 m^2/g < ss < 35 m^2/g
Capacité d'échange	8 meq/100 g
Ca échangeable	1,8 meq/100 g
Na échangeable.....	0,99 meq/100 g
Granulométrie : < 2 μ	98,5 p. 100
Minéralogie	plus de 95 p. 100 de Kaolinite

TABLEAU 2

Caractéristiques du squelette
Squeleton characteristics

Densité de solide : $\bar{\gamma}_s$	2,65
Granulométrie	200 μ-500 μ (98 p. 100)
Minéralogie	plus de 95 p. 100 de silice

Aussi bien la nature minéralogique de l'argile que la granulométrie du mélange ont été choisis de manière à ce que les seuils hydriques de changement d'état, dans les conditions de l'essai, soient particulièrement bien définis.

La fabrication du mélange est faite par malaxage avec un excès d'eau jusqu'à homogénéisation aussi complète que possible ; le matériau est alors séché à 105 °C, puis broyé et tamisé à 2 mm.

1.3. — *Adjonction de matières organiques libres*

Les matières organiques libres ont été incorporées dans le matériau FLK 15 après broyage et tamisage à 2 mm.

— *Une tourbe blonde à sphaignes* (Floratorf). Dépourvue d'éléments minéraux qui auraient modifié la granulométrie du support minéral, elle a une capacité de rétention en eau importante, mais peut présenter des phénomènes d'hystérésis après des séchages poussés. On a choisi de l'utiliser après séchage à l'air de manière à pouvoir la broyer ($W = 40$ p. 100).

— *Une paille* choisie à cause de sa très faible affinité pour l'eau ; elle est utilisée après séchage à l'air ($W = 7{,}5$ p. 100).

Avec ces matériaux, on ne peut pas parler de densité de solide.

Chaque brin de tourbe ou de paille a une porosité propre liée à sa constitution et à sa déformation au cours du compactage. C'est pourquoi la densité de la paille ou de la tourbe en place dans le mélange minéral est difficilement appréciable.

On a mesuré, au pycnomètre à air, les densités de la tourbe et de la paille, broyées et tamisées à 2 mm, avant mélange avec le matériau minéral. Ce sont ces valeurs que nous retiendrons pour ne pas sous-évaluer l'incidence de la porosité propre à la paille et à la tourbe.

Nous prendrons comme valeur :

— densité de la tourbe = 1,0,
— densité de la paille = 1,2.

Nous avons incorporé les matières organiques libres dans le matériau minéral sec, broyé et tamisé à 2 mm.

1.4. — *Adjonction de matières organiques liées*

— *Acides humiques.* Ils ont été extraits de la tourbe Floratorf par l'action d'une solution de soude N/10. L'incorporation à la phase argileuse a été obtenue par coflo-culation des acides humiques et de la Kaolinite H^+ par $CaCl_2$.

Après lavage et centrifugation pour éliminer le $CaCl_2$ en excès, la pâte obtenue est mélangée au squelette par malaxage dans un excès d'eau jusqu'à homogénéisation aussi complète que possible.

Le mélange est séché à l'air, broyé, tamisé à 2 mm.

— *Le polyéthylène glycol* 20000 (*P.E.G.*). Il provoque une diminution de la rétention d'eau dans la phase argileuse, en réalisant des liaisons argile-P.E.G. au détriment des liaisons préexistantes eau-argile (Chassin, 1975). Soluble dans l'eau, il est incorporé dans la phase argile par l'intermédiaire de l'eau de malaxage. Le mélange est séché à l'air, broyé et tamisé à 2 mm. Le P.E.G. étant volatil à partir de 60 °C environ, les poids secs (105 °C) doivent être corrigés du P.E.G. évaporé.

— *Le polyacrylate de sodium* est un produit organique à longues molécules qui augmente la stabilité des agrégats et la vitesse d'ascension capillaire (Monnier, 1965). Soluble dans l'eau, il a été amené par pulvérisation sur le mélange minéral (FLK 15) après broyage et tamisage à 2 mm (Hénin *et al.*, 1956).

A part le polyacrylate de sodium dont l'efficacité maximale est obtenue pour une teneur de 1 p. 1 000 pondéral, les produits organiques ont été incorporés de telle sorte que le rapport $\frac{MO}{A}$ soit de l'ordre de 0,12 à 0,13, soit légèrement supérieur au rapport moyen des sols agricoles.

1.5. — *Technique de compactage et éléments d'interprétation*

Les échantillons sont humectés par vaporisation jusqu'à obtention du poids d'eau désiré. Ils sont laissés, à température constante, pendant 8 jours afin d'homogénéiser l'humidité.

Le poids sec est obtenu après séchage à 105 °C jusqu'à ce que la perte de poids soit nulle (environ 8 jours).

Dans le tableau 3, on a reporté les conditions expérimentales du compactage Proctor.

TABLEAU 3

Conditions expérimentales de compactage
Experimental conditions of the compaction test

Energie	6 kg cm/cm³		1,5 kg cm/cm³
Diamètre	⌀ 7,0 cm	⌀ 3,5 cm	⌀ 7,0 cm
Volume	300 cm³	75 cm³	300 cm³
Hauteur	78 cm	78 cm	78 cm
Dame	1 kg	250 g	500 g
Hauteur de chute	20 cm	20 cm	20 cm
Nombre de couches	3	3	3
Nombre de coups.....	30	30	15
Matière organique	libre	liée	

Le volume de deux moules est inférieur à celui du moule Standard Proctor pour réduire les besoins en matériaux, surtout dans le cas de la matière organique liée.

Eléments d'interprétation (Faure, 1978).

Le test Proctor, pour une énergie de compactage standard (6 kg cm/cm³), permet de définir, sur le graphe $\overline{\gamma}_d = f(W)$, les limites de changement d'état du matériau (fig. 1) :

— limite de plasticité à 6 kg cm/cm³ ou seuil hydrique de sensibilité au compactage W_c ;

— limite de liquidité à 6 kg cm/cm³ ou optimum Proctor (teneur en eau au maximum de compacité), W_m.

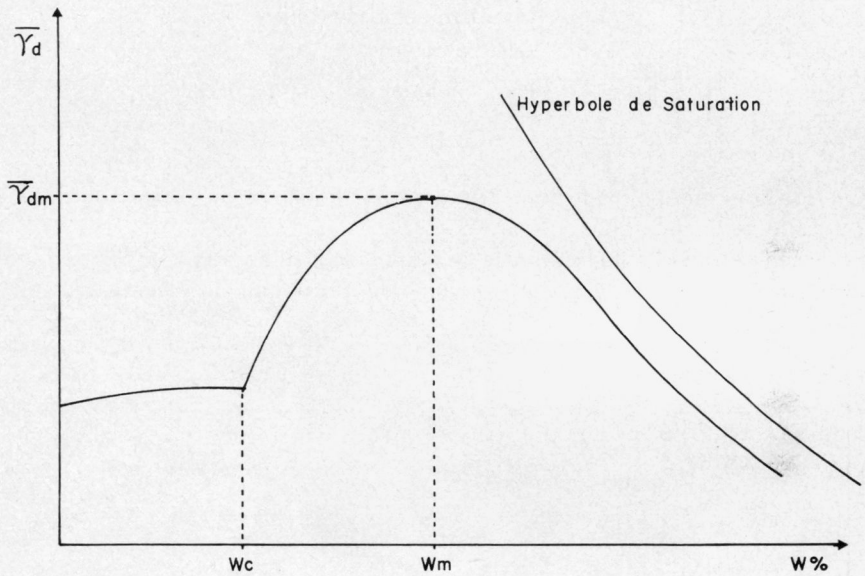


FIG. 1. — *Courbe de compactage Proctor. Limites de changement d'état.*
Proctor curve, consistency limits.

On peut donc définir trois zones :

$W < W_c$ — *Etat solide.*

L'augmentation de la teneur en eau s'accompagne :

— de la diminution de la cohésion : la compacité de l'éprouvette dépend alors du réarrangement des agrégats concassés ;

— du gonflement des agrégats.

Si l'effet du gonflement l'emporte, $\overline{\gamma}_d$ diminue (la pente de la courbe est négative).

$W_c < W < W_m$ — *Etat plastique.*

L'entrée en plasticité du matériau minéral correspond à l'entrée en plasticité de sa phase argile. La limite de plasticité W_a d'une argile est une constante pour une

énergie donnée. A cette même énergie, le matériau qui la contient, entre en plasticité pour une teneur en eau telle que $W_c = A.W_a$.

La densité du matériau $\bar{\gamma}_d$ est une fonction croissante de W jusqu'à un maximum proche de la courbe de saturation obtenue pour W_m. La pente traduit l'efficacité de l'argile comme lubrifiant dans l'arrangement des grains du squelette pendant le compactage.

$W > W_m$ — *Etat liquide.*

La densité $\bar{\gamma}_d$ du matériau décroît. La courbe Proctor est parallèle à l'hyperbole de saturation. L'écart expérimental entre cette courbe et l'hyperbole de saturation correspond à la présence de gaz piégés.

Le terme W_m — W_c correspond à un indice de plasticité à 6 kg cm/cm³.

2. — Résultats et discussion

2.1. — *Action des matières organiques libres*

2.11. *La Tourbe* (fig. 2).

On constate que l'introduction de tourbe se manifeste par une forte diminution de la densité de l'échantillon compacté.

Pour se fixer une limite inférieure de l'influence de la porosité propre à la tourbe en place, on substitue par le calcul le volume de tourbe par un volume équivalent de

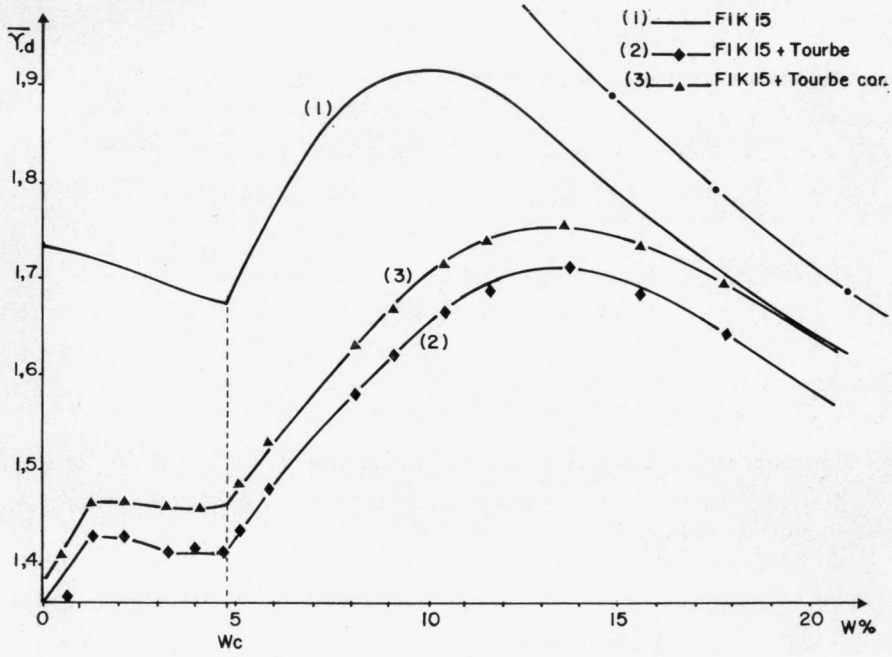


FIG. 2. — *Influence de la tourbe.*
Peat influence.

solide. On obtient alors une courbe corrigée (3) qui montre bien que cet élément n'explique qu'une part minime de la diminution de la densité.

A l'énergie considérée (6 kg cm/cm³), la tourbe n'a aucun rôle sur l'humidité à l'entrée en plasticité du système. Par ailleurs, elle diminue le pouvoir lubrifiant de l'argile pendant le compactage, car la pente de la courbe, située entre le seuil d'entrée en plasticité et le maximum de compacité, est inférieure à celle de la courbe de l'échantillon témoin.

2.12. *La Paille* (fig. 3).

Outre les mêmes effets que la tourbe (diminution de $\overline{\gamma}_d$ et du pouvoir lubrifiant de l'argile), on constate une augmentation de la teneur en eau au seuil de sensibilité au compactage qui peut s'écrire : $\frac{W_c}{A} = W_a + \Delta W$. L'existence de cet accroissement de teneur en eau ΔW peut être expliquée par deux hypothèses :

— soit la quantité d'eau ΔW a été « détournée » de l'argile par la paille. Or celle-ci a une très faible rétention d'eau ;

— soit l'accroissement ΔW est nécessaire à l'entrée en plasticité de l'argile pour compenser une part de l'énergie de compactage non transmise à la phase argile.

Cette dernière hypothèse est confirmée par les résultats obtenus en compactant le témoin minéral FLK 15 avec une énergie de 1,5 kg cm/cm³. La courbe qui en résulte (2) montre que l'introduction de 2 p. 100 de paille équivaut à une diminution de l'énergie transmise à la phase argile de 6 kg cm/cm³ à 1,5 kg cm/cm³ (courbe 3).

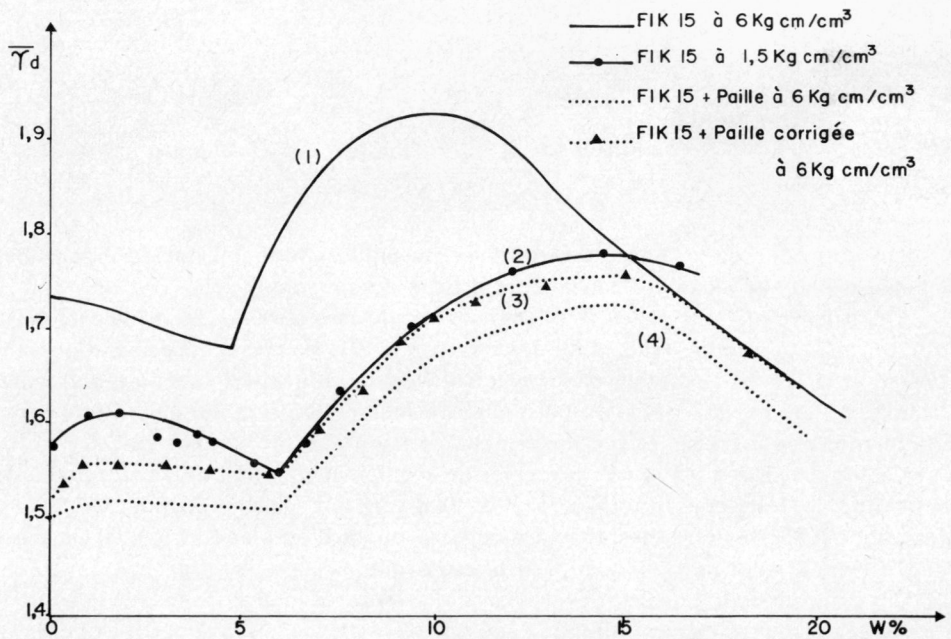


FIG. 3. — *Influence de la paille.*
Straw influence.

En raisonnant par analogie, on peut attribuer à la paille un comportement similaire à celui d'un ressort qui, à chaque coup de dame, se comprimerait et se détendrait, en partie tout au moins, restituant ainsi une part de l'énergie appliquée ; on aurait ainsi une relaxation instantanée du matériau, entre chaque coup de dame.

A l'œdomètre par contre, cette relaxation peut être supprimée et la densité du matériau mesurée sous charge. Une fois cette charge enlevée, la mesure de la relaxation finale du matériau permet d'appréhender son « élasticité ».

Les résultats à une humidité commune de 10 p. 100 montre que, pour le Proctor, l'introduction de 2 p. 100 de paille dans le système provoque une augmentation de l'indice des vides de 57 p. 100. A l'œdomètre sous charge, cette augmentation n'est que de 13 p. 100. Elle est due probablement, en grande partie, à l'effet stérique des brins de pailles. Quand on supprime la charge de l'œdomètre, après un équilibre de 24 h, le témoin minéral ne se relaxe pas ; par contre, le matériau enrichi en paille se relaxe de 12 p. 100 de l'indice des vides en charge (tabl. 4).

TABLEAU 4

Mise en évidence de « l'élasticité » de la paille
Straw « elasticity »

w = 10 p. 100

	Proctor 6 kg/cm³		Oedomètre 10,4 kg/cm²		Oedomètre relaxé		
	γ_d	e (1)	γ_d	e_c (2)	γ_d	e (3)	$\frac{(3)-(2)}{(2)}$ p. 100
Témoin FLK 15 (I)	1,93	0,37	1,74	0,52	1,74	0,52	0 p. 100
FLK 15 + Paille (II)	1,66	0,58	1,65	0,59	1,58	0,66	12 p. 100
$\frac{(II)-(I)}{(I)}$ p. 100	—	57 p. 100	—	13 p. 100	—	27 p. 100	

On voit donc qu'à l'énergie considérée, la paille intervient, par ses propriétés « élastiques », sur le seuil d'entrée en plasticité notamment.

L'élasticité, au sens strict, implique une totale réversibilité de la déformation. Pour un mélange paille-minéral, la déformation à 10,4 kg/cm² n'est pas entièrement réversible, on parle alors d'un comportement élastoplastique. Lorsque la réversibilité est nulle, le comportement est dit plastique. Un même matériau, lorsqu'on augmente la contrainte, peut présenter successivement ces trois types de comportement.

La tourbe Floratorf pure présente un comportement élastique jusqu'à une contrainte de 1 kg/cm² ; au-delà, elle devient très vite plastique (Monnier, 1975). Ainsi, dans le cas de notre essai (6 kg cm/cm³), la tourbe n'est plus élastique et transmet intégralement l'énergie appliquée à la phase argile.

On constate donc que les matières organiques libres interviennent sur la compacité des matériaux minéraux en induisant, par effet stérique, un espace poral dont la déformabilité est fonction de l'énergie appliquée et du comportement mécanique propre à cette fraction organique libre.

2.2. — *Action des matières organiques liées*

2.21. *Sur le seuil de sensibilité au compactage.*

Le compactage Proctor ne révèle aucune modification du seuil d'entrée en plasticité de la phase argileuse par l'adjonction des produits organiques utilisés (cf. tabl. 5).

TABLEAU 5

Effet des produits organiques liés sur le seuil $\frac{W_c}{A}$

Effect of bound organic products on plastic limit $\frac{W_c}{A}$

	∅ 70		∅ 35		
	FLK 15	FLK 15 + P. E. G.	FLK 15	FLK 15 + Na polyacrylate	FLK 15 + acides humiques
A p. 100	15	16,5	17	16,5	17
W_c p. 100	4,8	5,3	5,4	5,4	5,4
W_c/A p. 100	32	32	32	33	32

Deux types de conclusion peuvent être émis :

a) la teneur en eau au seuil d'entrée en plasticité de la phase argileuse est indépendante du mode de fixation eau-complexe argilo-organique et de la nature des produits fixés, au moins au niveau d'énergie de compactage utilisée ;

b) le taux de fixation des molécules organiques choisies est trop faible pour provoquer une différence sensible, compte tenu des caractéristiques physico-chimiques de la kaolinite dont nous disposions (capacité d'échange faible, relativement désaturée).

2.22. *Sur le comportement des agrégats dans la première partie de la courbe.*

Avant l'entrée en plasticité, l'allure de la courbe résulte essentiellement de l'interaction de la cohésion des agrégats avec les possibilités de gonflement de la phase argile. On considère que si la pente est positive, l'effet du gonflement est masqué par le réarrangement des agrégats au fur et à mesure que leur cohésion diminue. Si la pente est négative, l'effet du gonflement l'emporte.

Ainsi (fig. 4), les acides humiques et le polyéthylène glycol masqueraient les effets du gonflement et augmenteraient la cohésion des agrégats ; par contre, le polyacrylate de sodium amplifierait l'effet du gonflement et diminuerait la cohésion.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par Rogowski et Don Kirkham (1976) qui montrent que la cohésion d'agrégat est liée à leur teneur en matière organique et à leur humidité.

2.23. *Sur les propriétés lubrifiantes de l'argile.*

Si on considère que la pente de la courbe, après le seuil de sensibilité au compactage W_c, traduit l'efficacité de l'argile quant à son effet lubrifiant, on constate (fig. 4)

que le polyacrylate de sodium augmente cette efficacité et que les acides humiques (fig. 4) la diminuent.

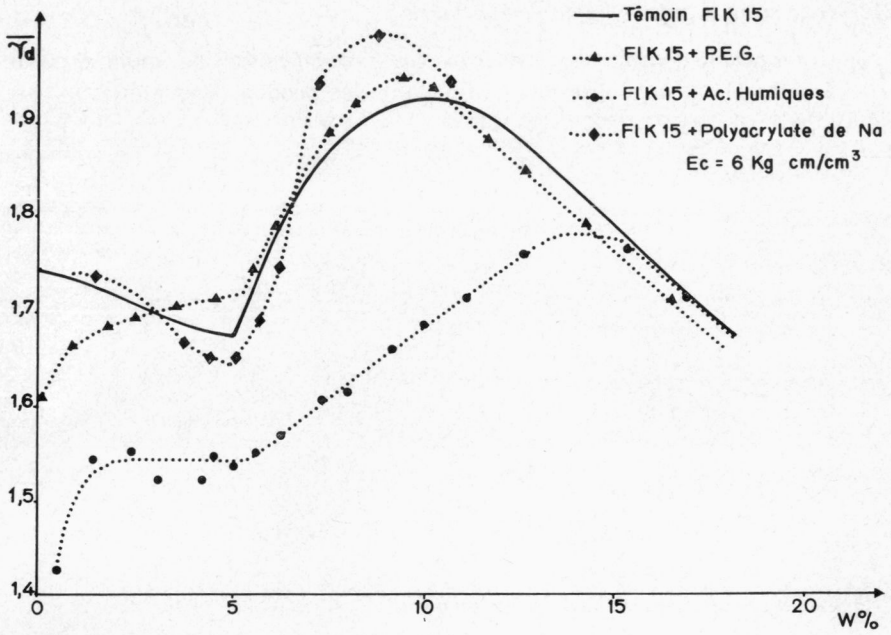


FIG. 4. — *Influence des produits organiques liés.*
Influence of organic products bound to clay.

Ces conclusions peuvent aussi s'exprimer en disant que le polyacrylate de sodium diminue l'indice de plasticité à 6 kg cm/cm³ et que les acides humiques l'augmentent.

Conclusion

Les résultats de ce travail permettent d'affirmer qu'il n'existe pas un modèle unique d'action de la matière organique vis-à-vis du comportement mécanique des sols. Ce constituant du sol est susceptible d'intervenir à différents niveaux suivant la nature et la diversité de ses composants :

— par leurs tailles et leurs formes, ils modifient les lois d'assemblage des particules (effet stérique) ;

— par leurs propriétés physico-chimiques, ils modifient les propriétés d'hydratation et les propriétés rhéologiques de la phase argile ;

— par leurs propriétés mécaniques, ils modifient le rendement d'application de l'énergie de compactage à la phase argile.

L'utilisation du test Proctor dans ce domaine a permis de définir un peu mieux les variables à prendre en compte pour l'étude de l'influence des matières organiques.

L'énergie standard de ce test n'a pas été suffisamment discriminante, pour permettre de différencier l'action des produits organiques liés sur la limite de plasticité.

Pour poursuivre ce travail, il faudra donc faire varier les niveaux d'énergie, mais aussi mesurer les variations induites par la fraction liée, au niveau du gonflement, de la cohésion et de l'angle de frottement interne du matériau. Cette dernière variable permettrait de traduire les modifications des propriétés lubrifiantes de l'argile.

Les matières organiques libres confèrent au minéral certaines propriétés élastiques que l'on peut quantifier par des mesures de relaxation en œdométrie. Tout en prenant en compte l'effet dose, il semble important de faire varier les propriétés mécaniques d'une matière organique libre. Pour ce faire, on fera varier la taille de ses constituants, leur degré d'évolution, leur localisation et le niveau de l'énergie de compactage appliquée.

D'un point de vue méthodologique, ce travail a confirmé l'efficacité, dans l'étude du rôle des matières organiques dans les comportements mécaniques des sols, d'une approche phénoménologique par rapport à une approche substantialiste. Les matières organiques, semble-t-il, doivent être modélisées en tant qu'inducteurs de comportement, du moins en l'état actuel de nos connaissances.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Summary

Influence of organic matter on the mechanical behaviour of soils during compaction.
II. — *Free and bound organic matter*

The influence of organic matter on the mechanical behaviour of soils during compaction is studied, by Proctor test, discriminating the free organic matter from the organic fraction bound to clay.

The free organic matter induces a decrease of the bulk density of the tested soil. This supplementary pore space is due to the sterical effect of the organic fragments. According to their mechanical properties a relaxation of the sample can be observed. The consistency limits, plastic and liquid limits as we defined them by the Proctor test, are modified.

The bound organic matter changes the rheological properties of the clay fraction. This should be studied by measuring the induced variations of swelling, cohesion and internal frictional resistance.

Zusammenfassung

Einfluss der organischen substanzen auf das bodenverfestigungsverhalten
II. — Freie und gebundene organischen substanzen

Der Einfluss der organischen Substanzen auf das Bodenverfestigungs verhalten wird mit « test proctor » untersucht, indem die freie Fraktion von der gebundenen Fraktion unterschieden wird.

Die freien organischen Substanzen verursachen eine Abnahme der Festigkeit des getesteten Materials durch sterischen Effekt aber auch durch die Entspannungsfähigkeit, die sie dem Material gewähren, wenn seine mechanischen Eigenschaften es ermöglichen. Es ist mit Anderungen der Wasserstoffschwellen des Wechsels des Materialszustands : Nachgiebigkeits- und Flüssigkeitsgrenze verbunden.

Die gebundenen organischen Substanzen verursachen Anderungen der rheologischen Eingenschaften der Tonphase, die durch Messungen der Schwankungen der Aufblähung, der Bindekraft und des inneren Reibungswinkels des Materials ausgedrückt sein könnten.

РЕЗЮМЕ

Влияние органических веществ на поведение почвы при уплотнении.

II. — Свободные и связанные органические вещества.

ГЕРИФ Ж.

Влияние органических веществ на поведение почвы при уплотнении изучалось с помощью пробы Проктора /свободная фракция и связанная фракция отличались/.

Свободные органические вещества уменьшают плотность опытного материала вследствие стерическояо эффекта и тоже способности затухания, которую они придают материалу, если механические особенности это позволяют. Такие явления сопровождаются изменениями порогов гидратации, соответствующих переменам состояния материала : граница пластичности и граница текучести.

Связанные органические вещества вызывают изменения реологических особенностей фазы глины, которые выражают измерения изменений набухания, сцепления и угла внутреннего трения материала.

Références bibliographiques

CHASSIN P., 1975. *Etude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols : hydratation des complexes montmorillonite-diols.* Thèse Université Paris VI.

FAURE A., 1978. *Comportement des sols au compactage. Rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains.* Thèse Université scientifique et médicale de Grenoble.

FIÈS J. C., 1978. *Porosité du sol : étude de son origine texturale.* Thèse à l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg.

GUÉRIF J., FAURE A., 1979. Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. I. — Etude statistique. *Ann. agron.* **30.**

HÉNIN S., CARDEY F. et ROESH A., 1956. Méthode permettant le contrôle de la résistance des conditionneurs de sols aux actions microbiennes. *C. R. Acad. Sci.* **243,** 1899.

HÉNIN S. et TURC L., 1949. Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C. R. Acad. Agric.*, **35,** 41-43.

MONNIER G., TURC L., JEANSON LUUSINANG V., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.* **13,** 55-63.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Fac. des Sciences, Paris.

MONNIER G. Propriétés physiques et mécaniques des substrats de culture (données non publiées).

ROGOWSKI A. S., DON KIRKHAM, 1976. Strenght of soil aggregates : influence of size, density and clay and organic matter content. *Méd. Fac. Landbouww Rijkuniv*, Gent 41/1.

cf . Van Dijck 71 colloid γ properties of AH in Soil biochemistry (2) 16.35

. Chassin 79 Clay minerals

~~Rogowski~~

permet, lorsqu'il existe une relation linéaire entre ces deux variables, de calculer l'énergie critique de la surface qui permet de prévoir quels liquides recouvriront le solide (Adamson, 1976). Ainsi, avec les solutions eau-EG, l'énergie critique de la surface obtenue par extrapolation à $\cos\theta = 1$ est voisine de 47 dy/cm, valeur caractéristique des surfaces basses énergies constituées de polymères contenant du carbone, de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'azote. Il existe donc ici un très bon accord entre les comportements observés sur des acides humiques et des polymères de synthèse.

Avec les solutions eau-DEG, on n'observe pas de variation linéaire entre $\cos\theta$ et γ mais au contraire une brusque variation de $\cos\theta$ quand la tension superficielle des solutions est voisine de 57,5 dy/cm.

Sans vouloir donner d'interprétations à la différence des propriétés observées entre les solutions eau-EG et eau-DEG, on déduit immédiatement de ces résultats que la dessiccation des acides humiques entraîne leur non-mouillabilité par l'eau ; les angles de contact mesurés étant élevés (63°) et voisins de ceux observés avec le polyéthylène (Adamson, 1976).

Ces observations sont donc analogues à celles de Tschapeck *et al.*, (1973) qui ont postulé que la dessiccation provoque la formation de liaisons hydrogène intramoléculaires entre les groupements hydrophiles (COOH, OH) et l'expulsion, vers l'extérieur, de groupements hydrophobes. C'est d'ailleurs de cette façon que Van Dijck (1971) et Chassin (1979) expliquent les modifications des propriétés d'hydratation des acides humiques quand ils sont soumis à une dessiccation de plus en plus poussée.

3.2. — *Estimation de la stabilité structurale*

On a mis à profit les variations très différentes de $\gamma\cos\theta$ des solutions eau-EG et eau-DEG (fig. 4) pour tenter d'estimer l'importance relative des phénomènes mis en cause pour expliquer la destruction des agrégats par l'eau, à savoir :

- Eclatement des agrégats dû à une augmentation de la pression de l'air : ce phénomène, qui a pour origine les forces capillaires, a été mis en évidence par de nom-

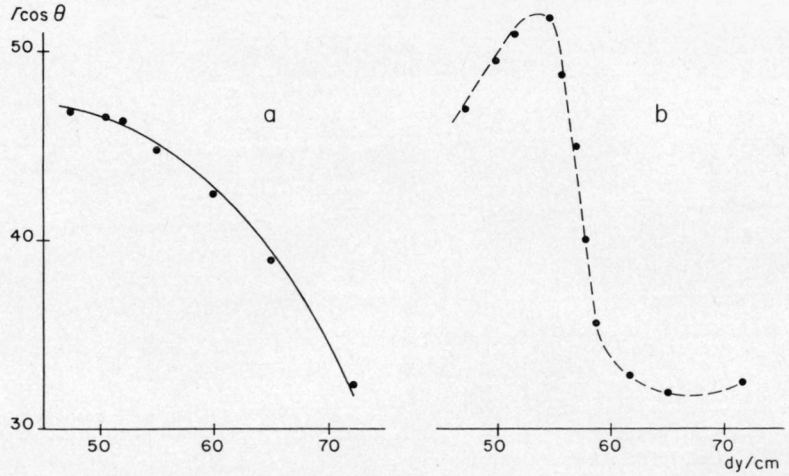


FIG. 4. — *Relation entre $\gamma\cos\theta$ et γ (eau-éthylène glycol, a ; eau-diéthylène glycol, b). Relation between $\gamma\cos\theta$ and γ (a : water-ethylene glycol ; b : water-diethylene glycol).*

breux auteurs. A ce sujet, le lecteur pourra consulter le traité de « Physique du Sol » publié par Hénin (1976).

• Diminution de la cohésion à l'état humide, consécutive à une dispersion des ciments et, notamment, à celle des argiles (Bolt and Koenings, 1972).

Quelle que soit la taille des agrégats utilisés, on observe que la quantité de particules mises en suspension, pour un traitement donné, est la même. C'est pour cette raison que nous nous sommes limités à la fraction 1-1,5 mm.

On a également remarqué que la densité optique des solutions, donc la quantité de particules mises en suspension, dépendait :

• du domaine granulométrique choisi : plus ce domaine est grand (0-2 μ ; 0-5 μ ; 0-10 μ ; 0-20 μ) et plus la densité optique est élevée ;

• de la présence ou non d'hexamétaphosphate : ainsi, en présence d'hexamétaphosphate, la stabilité des suspensions est beaucoup plus grande.

Toutefois, et ceci est très important, toutes les courbes densité optique-tension superficielle des solutions utilisées se déduisent les unes des autres par une simple homothétie. Ceci signifie donc que, dans nos conditions expérimentales, l'estimation de la stabilité structurale est indépendante du protocole choisi. On a donc décidé d'utiliser des solutions aqueuses contenant de l'hexamétaphosphate et de mesurer la

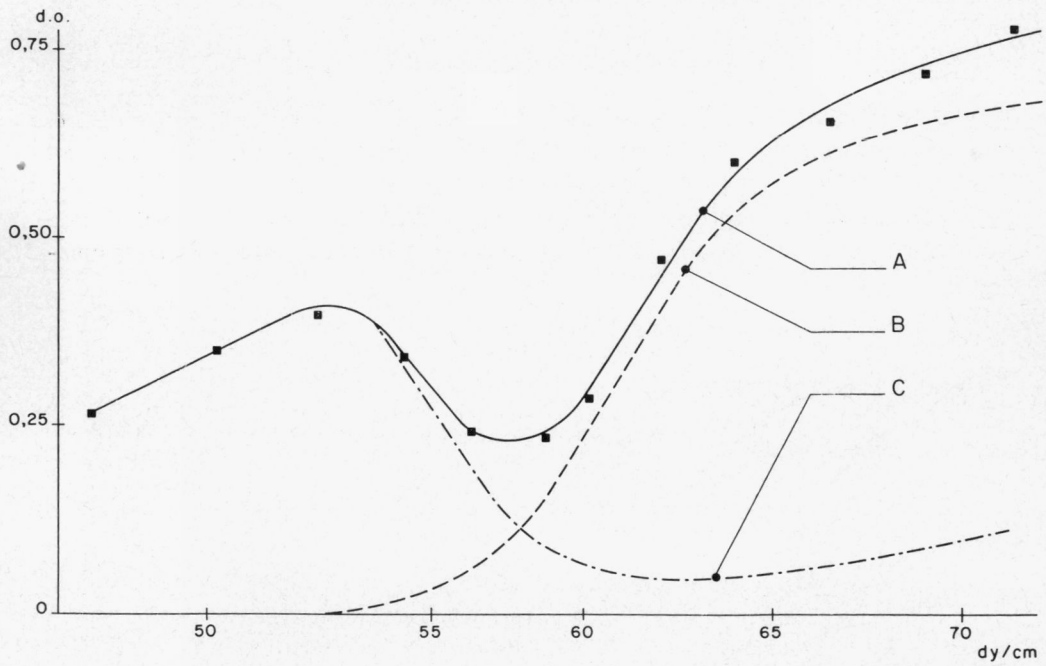


FIG. 5. — *Nombre de particules fines mises en suspension en utilisant différentes solutions eau-diéthylène glycol (courbe A : courbe expérimentale ; courbes B et C : contributions des phénomènes de dispersion des argiles et de fragmentation des agrégats).*

Number of fine particles enterring into suspension by using different water-diethylene glycol solutions (A : experimental curve ; B and C : roles played by the dispersing effect of clays and by aggregate fragmentation).

densité optique de suspensions contenant des particules ayant un diamètre équivalent inférieur à 5 μ.

Avec les agrégats utilisés, le nombre de particules mises en suspension dépend des solutions utilisées (fig. 5 et 6) ; variation monotone avec les solutions eau-EG alors qu'avec les solutions eau-DEG on obtient une courbe avec des extrêmums.

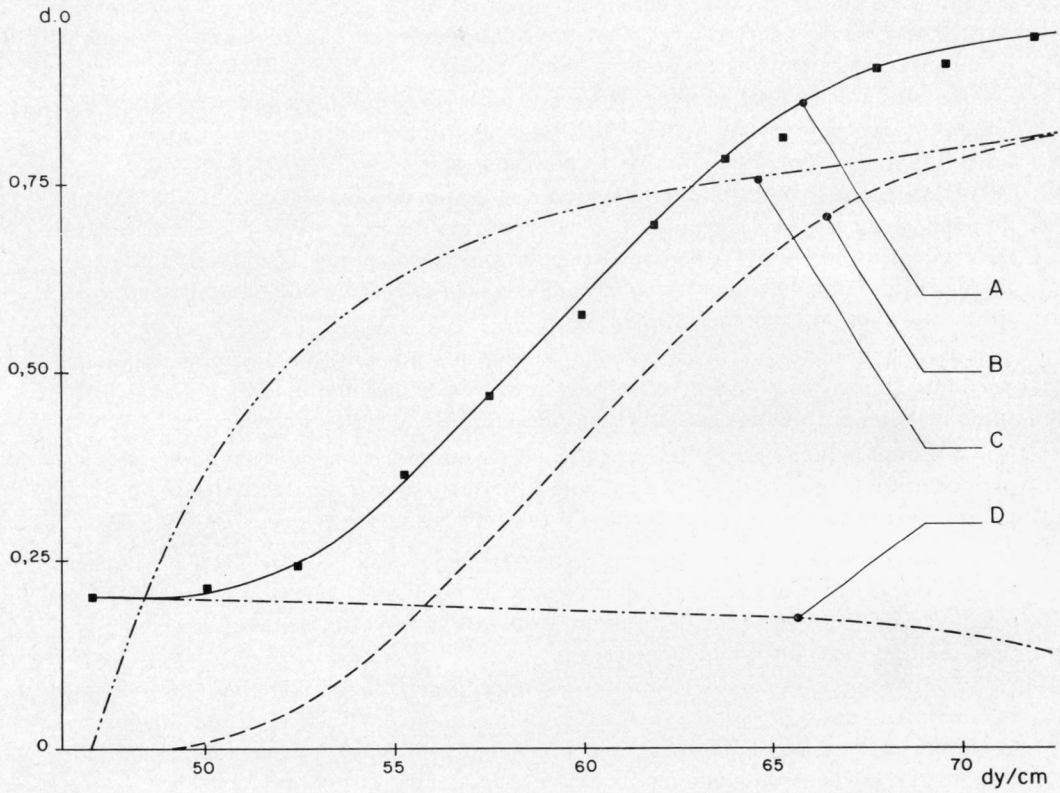


FIG. 6. — *Nombre de particules fines mises en suspension en utilisant différentes solutions eau-éthylène glycol (courbe A : courbe expérimentale ; courbes B et D : contributions des phénomènes de dispersion des argiles et de la fragmentation des agrégats ; courbe C : activité de l'eau en solution).*

Number of fine particles enterring into suspension by using different water-ethylene glycol solutions (A : experimental curve ; B and D : roles played by the dispersing effect of clays and by aggregate fragmentation ; C : activity of the water in solution).

Ce sont les solutions eau-DEG qui fournissent le plus d'informations quant à l'importance relative des mécanismes de destruction des agrégats. En effet, tant que la teneur des solutions en DEG est supérieure à 45 p. 100 (tension superficielle inférieure à 57 dynes/cm), le nombre de particules mises en suspension augmente puis diminue comme $\gamma \cos \theta$.

Comme par ailleurs, on n'observe seulement que la formation d'éléments d'assez grande taille ($\sim$ 0,1 mm), on peut donc conclure que les forces capillaires provoquent essentiellement la fragmentation des agrégats en unités de plus petite taille car l'aug-

mentation de pression de l'air est directement reliée à $\gamma \cos \theta$ (Hénin, 1976 ; Bolt et Koenigs, 1972).

Lorsque la teneur en eau des solutions eau-DEG est supérieure à 45 p. 100 (tension superficielle $>$ à 57 dynes/cm), on note une destruction totale des agrégats et la mise en suspension de quantités importantes de particules de petite taille. Comme, dans cette région, les forces capillaires restent sensiblement constantes (fig. 4 donnant $\gamma \cos \theta$ *vs* γ), on doit donc admettre que la quantité de particules mises en suspension, c'est-à-dire la destruction des agrégats, a une origine autre que les forces capillaires et, notamment, la dispersion des ciments argilo-humiques.

En résumé, on peut donc admettre que les forces capillaires induisent une fragmentation des agrégats en unités structurales de plus petite taille, suivie ou non, selon les solutions utilisées, d'une dispersion des ciments.

C'est à partir de cette interprétation que l'on a décomposé la courbe « nombre de particules mises en suspension » en deux courbes qui matérialisent les contributions respectives de chaque phénomène élémentaire (éclatement par compression pneumatique et dispersion des ciments) (courbes C et B sur fig. 5). Pour réaliser cette décomposition, on a fait les hypothèses suivantes :

- La quantité de particules mises en suspension par suite de la fragmentation des agrégats (forces capillaires) est le seul phénomène dominant tant que la tension superficielle des solutions eau-DEG est inférieure à 53-55 dynes/cm.
- La quantité de particules mises en suspension par suite de la fragmentation est proportionnelle à $\gamma \cos \theta$. Cette hypothèse permet de calculer la contribution de ce phénomène quand la tension superficielle des solutions est supérieure à 54-55 dynes/cm.

Nous verrons plus tard que ces hypothèses sont justifiées car il est possible de recalculer, à partir des résultats obtenus avec les solutions eau-EG, un diagramme de sélectivité des ciments, donc de la phase argileuse, très voisin de celui déterminé par une méthode totalement indépendante.

Avec les solutions eau-EG, on observe que la destruction complète des agrégats commence quand la tension superficielle des solutions est inférieure à 50 dynes/cm. En faisant les mêmes hypothèses que précédemment, il est possible de calculer la courbe D à partir de laquelle on obtient la courbe B en faisant la différence A-D.

Dans ce cas on n'observe pas de minimum car la variation de $\gamma \cos \theta$ *vs* γ est une fonction monotone décroissante (fig. 6). On a également reporté sur cette figure l'activité de l'eau dans les solutions eau-EG (courbe C) qui, rappelons-le, est égale à la fraction molaire en eau (Chassin, 1975 ; Gallant, 1967).

On peut être surpris que les courbes matérialisant le nombre de particules mises en suspension par dispersion (courbe B) et l'activité de l'eau dans les solutions eau-EG (courbe C) ne soient pas homothétiques avec, notamment, une discordance d'autant plus marquée que les solutions utilisées sont riches en EG. Cette remarque est d'ailleurs conforme à de nombreuses observations qui montrent que les argiles présentent une grande affinité pour l'EG, donc une sélectivité d'adsorption pour ce produit. En effet, et comme on peut admettre qu'à l'état adsorbé, activité et fraction molaire sont égales, l'existence du phénomène de sélectivité pour l'EG va se traduire par une diminution du coefficient d'activité de l'eau à l'état adsorbé.

Inversement, connaissant la quantité de particules mises en suspension par suite du phénomène de dispersion des ciments dans l'eau pure (coefficient d'activité de l'eau

égal à l'unité), on peut estimer le coefficient d'activité de l'eau, donc la fraction molaire, de la phase adsorbée pour différentes concentrations des solutions eau-EG. A partir de ces données, il devient possible de construire un diagramme de sélectivité en représentant la fraction molaire en EG de la phase adsorbée en fonction de la fraction molaire en EG de la solution (fig. 7).

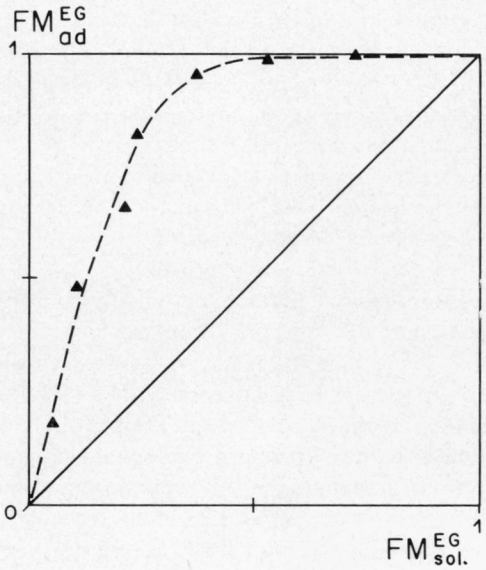


FIG. 7. — *Variation de la fraction molaire en éthylène glycol de la phase adsorbée en fonction de la fraction molaire en éthylène glycol des solutions.*

Variation of the molar fraction of ethylene glycol in the adsorbed phase as a function of the molar fraction of ethylene glycol in the solutions.

On remarque immédiatement que le diagramme de sélectivité ainsi calculé est très voisin de celui qui caractérise la phase adsorbée au voisinage immédiat des surfaces des argiles, notamment de la montmorillonite calcique (Chassin, 1975). En particulier, il a été mis en évidence que la phase adsorbée au contact de la surface des argiles ne contenait plus d'eau dès que les solutions eau-EG contenaient moins de 20 à 25 p. 100 d'eau. Dans notre expérience, on peut considérer que l'activité de l'eau est nulle pour toutes les solutions dont la tension superficielle est inférieure à 50 dy/cm, c'est-à-dire contenant moins de 20 p. 100 d'eau (cf. fig. 1).

La très bonne concordance de ces résultats obtenus par des méthodes totalement indépendantes justifie donc la décomposition des courbes « nombre de particules mises en suspension » telle que nous l'avons faite.

IV. — Conclusion

Dans cet article, nous avons mis en évidence que l'utilisation d'une technique simple telle que la mesure de l'angle de contact acides humiques/ solutions aqueuses de diols/air, offrait une possibilité intéressante pour caractériser les propriétés des sur-

faces des acides humiques qui, rappelons-le, vont gouverner certaines propriétés des sols (adsorption des pesticides, mouillabilité, énergie interfaciale...). C'est ainsi que nous avons déterminé, en utilisant des formalismes mis en place pour caractériser les solides à faible énergie de surface, une tension superficielle critique des acides humiques très voisine de celle observée avec les polymères de synthèse contenant du carbone, de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène.

On a également montré que la caractérisation des interfaces acides humiques-solutions aqueuses de DEG permettait d'estimer l'importance relative des phénomènes d'explosion capillaire et de dispersion des ciments invoqués pour expliquer la destruction des agrégats. C'est ainsi qu'il est raisonnable de penser que, dans des solutions riches en eau, la destruction des agrégats, estimée par la quantité de particules fines mises en suspension, a essentiellement pour origine la dispersion des ciments. Inversement, avec des solutions riches en diol, la fragmentation des agrégats par les forces capillaires, en unités structurales de plus petite taille ($\sim$ 0,1 mm), est le phénomène dominant.

Ces observations permettent d'ailleurs de mieux comprendre l'utilisation de produits organiques possédant des fonctions alcool pour révéler l'état fissural des sols (Bui Huu Tri et Monnier, 1973). En effet, avec ces liquides, seuls les phénomènes capillaires vont exister, de telle sorte que les agrégats vont se fragmenter en unités structurales de plus petite taille, suivant les points de plus faible résistance. Il est bien entendu que l'utilisation d'un liquide tel que l'eau sera inadéquate car apparaîtront simultanément les phénomènes de fragmentation et de dispersion des ciments.

Il semble toutefois important de vérifier si la taille des unités structurales résultant de la fragmentation des agrégats correspond à des entités préexistantes caractéristiques du mode de gestion adopté pour les sols et non du liquide utilisé. Ainsi deviendrait-il possible de relier des concepts tels que porosité structurale et porosité texturale à des caractéristiques physico-chimiques du milieu.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Summary

Determination of the angle of contact of humic acids-diols solutions. Consequences on the mechanisms of aggregate destruction

In this paper, it is shown that :

- dehydration of humic acids induces formation of hydrophic surfaces on which water exhibits an advancing angle of contact of about 60 degrees ;
- the mechanisms of aggregate destruction (capillary forces and dispersion of clays) and the entry into suspension of fines particles depend upon the nature of the fluid medium. With water, the entry into suspension of fines particles is essentially due to a dispersing effect ; whereas, with ethylene glycol and diethylene glycol, aggregate fragmentation by capillary forces is prevalent.

Zusammenfassung

Bestimmung des Benetzungswinkels der Humussäueren Wässrige Diollösungen Folgen auf die relative Wichtigkeit der Zerstörungsmechanismen der Aggregate

In dieser Mitteilung wird gezeigt :

— dass die Austrocknung der Humussäuern die Bildung räumlicher wasserabweisende, durch nahe bei 60° liegende Benetzungswinkel gekennzeichnete Strukturen erzeugt ;

— dass die, durch die Zerstörung der Aggregate bedingte Aufschwemmung der feinen Partikel,

je nach den benutzten Lösungen, sehr verschiedene Ursprünge hat (Kapillare Kräfte oder Dispersion des Tons). So zum Beispiel, mit Wasser hat die Aufschwemmung der feinen Partikel hauptsächlich die Dispersion des Tons als Ursprung, dagegen mit an Äthylenglycol oder Diäthylenglycol reichen Lösungen, ist diese Aufschwemmung wesentlich durch die Zerteilung der Aggregate mittels kapillarer Kräfte bedingt.

РЕЗЮМЕ

Определение угла контакта между гуминовыми кислотами и волными растворами диолов. Последствия в смысле относительной важности механизмов разрушения агрегатов.

ШАССЕН П.

В данной работе доказывается что :

— Высушивание гуминовых кислот индуцирует образование пространственных гидрофобных очертаний, характеризующихся углами контакта вода-твердое вещество приближающимися к 60°

— переход мелких частичек полученных при разрушении агрегатов в состояние суспензии вызывается совершенно разными причинами (капиллярные силы, дисперсия глины), в зависимости от применявшихся растворов. Так, например, дисперсия глины вызывает получение суспензии мелких частичек в воде, в то время как применении растворов богатых этилен-гликолом, или ди-этилен-гликолом, переход мелких частичек в состояние суспензии вызывается главным образом фрагментацией агрегатов капиллярными силами.

Références bibliographiques

ADAMSON A. W., 1976. *Physical chemistry of surfaces*. 3 rd Ed. John Wiley & Sons, Inc. 698 p.

BOLT G. H. and KOENIGS F. F. R., 1972. Physical and chemical aspects of the stability of soil aggregates. *Med. Fac. Land bouw Rijkuniv. Gent* **37** (3), 955-973.

BUI HUU TRI et MONNIER G., 1973. Etude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminées. *Ann. agron.* **24** (4), 401-424.

CHASSIN P., 1975. *Etude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols. Hydratation des complexes montmorillonite diols*. Thèse Fac. Sci. Paris.

CHASSIN P. et LE BERRE B., 1979. Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. Déshydratation des acides humiques. *Clay Miner.* (à paraître).

GALLANT R. W., 1967. Physical properties of hydrocarbons. VIII. Ethylène glycol. *Hydrocarbon Process* **46** (5), 201-215.

HÉNIN S., 1976. *Cours de Physique du sol*. I. *Texture, structure, porosité*. Orstom edidest. 159 p.

TSCHAPEK M., POZZO ARDIZZI G. and DE BUSSETI S. G., 1973. Wettability of humic acids and its salts. *Z. Pflanzeneraehr. Bodenkal.* (1), 16-31.

VAN DIJK H., 1971. Colloïd chemical properties of humic matter. In *Soil Biochemistry* (2), 16-35. Marcel Dekker, Inc., New York.

Ann. agron., 1979, **30** (6), 493-512.

Géochimie des éléments majeurs des micas en milieu organique : mécanismes de l'altération des silicates

M. K. RAZZAGHE * et M. ROBERT **

* *Laboratoire de Géochimie, Université de Tabriz (Iran)*
** *Station de Science du Sol,*
Centre national de Recherches agronomiques I.N.R.A.,
78000 *Versailles (France)*

Résumé

Cette étude expérimentale concerne la géochimie des éléments majeurs (Si, Al, Fe, Mg, K) libérés lors de l'altération des micas trioctaédriques en milieu organique (acide ou acide et complexant). Elle prend en compte les conditions physicochimiques pouvant exister dans le milieu naturel : utilisation des principaux acides organiques de bas poids moléculaire susceptibles d'être présents dans les sols, pH de 3 à 5.

Deux types de conditions hydrodynamiques extrêmes sont mis en jeu : un milieu « confiné » avec renouvellement périodique des solutions, un milieu ouvert à vitesse de percolation élevée (20 cm^3/h).

Dans une première partie (milieu confiné), sont exposés les résultats sur la géochimie des principaux éléments qui permettent la mise en évidence des principaux mécanismes intervenant dans la libération de ces éléments à partir d'une structure de phyllosilicate.

Dans une deuxième partie, la comparaison des résultats obtenus en milieu confiné et en milieu ouvert permet d'établir une différenciation et même une hiérarchie entre les différents mécanismes susceptibles d'intervenir dans l'altération par des composés organiques acides. Ainsi les deux mécanismes principaux (action des protons, formation de complexes) interviennent l'un après l'autre :

— la dissociation des acides est un phénomène rapide, ce qui donne le rôle essentiel et initiateur dans la destruction des structures et la libération des éléments aux protons ;

— la complexation, phénomène moins rapide, n'intervient que dans un deuxième temps et sur certains éléments (Al-Fe), déjà en solution. Elle se produit surtout avec les complexants les plus énergiques : acides oxalique et citrique.

Selon les conditions du milieu, on aura donc soit prépondérance de l'action acide, soit prépondérance de l'action acide et complexante avec des répercussions au niveau de la minéralogie et des processus de formation des sols.

Il existe un grand nombre de travaux concernant l'évolution de certains éléments chimiques en milieu organique, en particulier le fer et l'aluminium (Mortensen, 1963 ; Hem, 1960, 1972 ; Lind et Hem, 1975) et, effectivement, lorsque seules les réactions en solutions sont concernées, le comportement des éléments apparaît comme étant relativement bien connu. Il n'en est pas de même lorsque les éléments chimiques sont situés dans une phase solide silicatée et que les études concernent la libération de ces éléments ; plusieurs mécanismes peuvent alors être mis en cause dans ces processus d'altération.

Pendant longtemps le mécanisme d'action des protons a été considéré comme le mécanisme essentiel expliquant l'altération des silicates (Jenny, 1941 ; Frederickson,

1951 ; Keller et Frederickson, 1952). En effet, par leur taille et leur grande mobilité, les protons peuvent diffuser dans les structures et rompre les liaisons chimiques entre les éléments. Ainsi un grand nombre d'études cinétiques sur la mise en solution des silicates ont pu être réalisées, en milieu acide minéral concentré en particulier, par Brindley et Youell (1951), Gastuche (1963), Arvieu et Chaussidon (1964), Miller (1965) ; elles mettent en général en cause des réactions du premier ordre.

La formation de composés de coordination, ou de complexes, des cations avec des anions donneurs d'électrons est elle-même une réaction classique en chimie (Ringbom, 1967). Mais, là encore, la plupart des études concernent des réactions en solution intervenant entre un sel soluble et un complexant ; en revanche, la manière dont ils peuvent intervenir lors de la libération d'un élément d'une structure n'est pas encore bien connue. Différents auteurs (Schatz *et al.*, 1957 ; Schnitzer et Skinner, 1963 ; Schalsha *et al.*, 1967 ; Huang et Keller, 1970) pensent que des composés de type chélates peuvent se former et intervenir directement dans l'altération des silicates.

La principale difficulté rencontrée si on étudie l'altération des silicates est que les mécanismes précédents, auxquels peuvent d'ailleurs s'adjoindre l'échange d'ions ou les phénomènes d'oxydo-réduction, interviennent le plus souvent conjointement (Sticher et Bach, 1966) dans le milieu naturel. Une série de travaux expérimentaux récents peuvent nous permettre d'aller plus loin dans la compréhension du processus d'altération en milieu organique et dans la différenciation des mécanismes. Les résultats intéressent essentiellement les éléments majeurs (Si, Al, Fe, Mg, K) situés dans une structure phyllosilicatée (mica) et les principaux acides organiques simples susceptibles d'être présents dans le milieu naturel.

Dans une première partie, sont présentés les résultats concernant un système confiné qui permettent la mise en évidence des principaux mécanismes intervenant dans la libération des éléments chimiques. Dans une deuxième partie, la comparaison des résultats obtenus dans différents systèmes (clos et ouvert) permettra d'établir une différenciation, ou même une hiérarchie, entre les mécanismes susceptibles d'intervenir lors de l'altération par les composés organiques.

I. — Conditions expérimentales

— Les silicates choisis sont deux micas, une phlogopite et une biotite (tabl. 1) en cristaux de taille comprise entre 100 et 200 μ, où les principaux éléments chimiques

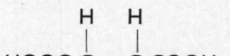
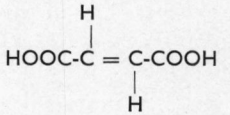
TABLEAU 1

Analyse totale (p. 100) *et formules structurales des micas* : (1) *phlogopite*, (2) *biotite*
Total analysis (p. 100) *and structural formula of micas*: (1) *phlogopite*, (2) *biotite*

	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	FeO	MgO	MnO	CaO	Na_2O	K_2O	H_2O	
(1)	38,33	17,42	1,15	3,05	1,48	23,60	0,54	0,07	0,60	10,15	4,40	100,79
(2)	36,92	14,69	3,94	1,11	17,74	11,53	0,35	1,03	0,31	8,55	2,52	99,21 *

(1) $Ca_{0,03}K_{0,88}Na_{0,05}(Al_{0,13}Ti_{0,06}Fe^{3+}_{0,12})(Fe^{2+}_{0,18}Mg_{2,47}Mn_{0,02})(Al_{1,31}Si_{2,69})O_{10}(OH)_{1,96}F_{0,14}$.
(2) $Ca_{0,03}K_{0,83}Na_{0,05}(Al_{0,10}Ti_{0,22}Fe^{3+}_{0,06})(Fe^{2+}_{1,12}Mg_{0,12}Mn_{0,02})(Al_{1,21}Si_{2,79}O_{10}(OH)_2$.
* Avec $P_2O_5 = 0,52$ (apatite).

TABLEAU 2 — *Principales caractéristiques des acides utilisés dans les expériences — Principal characteristics of acids used in the experiments*

	Acides organiques		Formules	pK_1	pK_2	pK_3	pH
Acides aliphatiques	A. Acides dicarboxyliques	oxalique	HOOC-COOH	1,2	4,2		3,22
		malonique	$HOOC-CH_2-COOH$	2,8	5,7		3,40
		succinique	$HOOC-(CH_2)_2-COOH$	4,2	5,6		3,70
	B. Acides dicarboxyliques (non saturés)	maléique(cis)		1,8	6,1		3,24
		fumarique(trans)		3,0	4,4		3,35
	C. Acides hydroxycarboxyliques						
	1. Monohydroxymonocarboxylique	lactique	$CH_3-CHOH-COOH$	3,1			3,35
	2. Monohydroxydicarboxylique	malique	$HOOC-CH_2CH-OH-COOH$				
			CH_2-COOH	3,4	5,1		3,53
	3. Monohydroxytricarboxylique	citrique	$HO-C-COOH$	3,1	4,7	5,4	3,48
			CH_2-COOH				
	4. Dihydroxydicarboxylique	tartrique	$HOOC-CHOH-CHOH-COOH$	3,0	4,3		3,40
	D. Acides gras	formique	H-COOH	3,8			3,45
		acétique	CH_3-COOH	4,8			3,90
		butyrique	$CH_3CH_2CH_2-COOH$	4,8			6,1
	E. Acides aldoniques (acides sucre)	gluconique	$CH_2OH-(CHOH)_4-COOH$	3,9			3,84
		2-cétogluconique	$CH_2OH-(CHOH)_3-CO-COOH$				5,05
	Acide préaromatique	quinique	Acide 1-3-4-5 tétrahydroxy-cyclohexane 1-carboxylique	3,5			3,38
	Acides aromatiques (S. S.)	salicylique	Acide 2-hydroxybenzoïque	3,0			3,10
		vanillique	Acide 4-hydroxy 3-méthoxybenzoïque				3,35
		hydroxybenzoïque	p-hydroxybenzoïque	4,5	9,3		3,25
	Acides aminés						
	1. Neutre	alanine	$NH_2-(CH_2)_2-COOH$	2,3	10		6,10
	2. Acide	aspartique	$HOOC-CH_2CH-(NH_2)-COOH$	3,9	9,8		3,60
	3. Basique	ornithine	$H_2N-(CH_2)_3CH-(NH_2)-COOH$	1,7	8,7		

occupent une place bien définie dans la structure, soit en couche tétraédrique (Si, Al), soit en couche octaédrique (Fe^{2+} et Mg), soit en couche interfoliaire (K). De tels minéraux micacés sont abondants dans le milieu naturel (roches cristallines et cristallophyliennes) et, de plus, leur strucure peut aussi être considérée comme un modèle pour les minéraux phylliteux 2/1 (illicites, vermiculites, smectites...) qui existent dans la fraction argile des sols. Ces deux minéraux ont une composition trioctaédrique (Mg^{2+} et Fe^{2+}), mais il est possible par une oxydation de la biotite par chauffage de passer à une composition dioctaédrique (Fe^{3+}) (Robert, 1970).

— Les acides utilisés sont soit des acides minéraux (HCl, H_2SO_4) qui servent de référence, soit les principaux acides organiques trouvés normalement dans le milieu naturel et qui sont formés lors de la décomposition de la matière organique (Bruckert, 1970 ; Berthelin, 1976). Une vingtaine d'acides dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau 2, ont été utilisés en concentration N/1 000, ce qui recouvre une zone de pH de 3 à 6 et surtout de 3 à 4. De telles valeurs de pH et de concentration en acide (10^{-3} N à 10^{-4} N) peuvent se rencontrer couramment dans le milieu naturel en conditions acides (Stevenson et Ardakani, 1972).

— Les acides ont été utilisés dans deux types de conditions très différentes :

a) un système confiné (ou clos) (100 mg minéral/100 ml acide, t = 60 °C) où la solution est renouvelée tous les 4 jours, c'est-à-dire au moment où un équilibre est atteint. Ce système peut représenter ce qui se passe dans les sols argileux ou hydromorphes ;

b) un système ouvert utilisant une pompe péristaltique où une solution acide à 60 °C passe continuellement sur 400 mg de micas maintenus dans une cellule (taux de percolation = 20 cm^3/h), ce qui peut représenter le drainage dans les sols sableux ou les arènes.

— Le dosage des éléments dans les solutions a été faite le plus souvent en spectroscopie d'émission de flamme (K) ou en spectroscopie d'adsorption atomique (Mg, Fe total, Al), avec ou sans destruction préalable des composés organiques présents. Dans le cas de faibles valeurs, l'utilisation d'un four graphite a été nécessaire (1). La silice a été dosée par colorimétrie (complexe bleu silicomolybdique) ; la proportion de fer ferreux ou ferrique en solution organique a été estimée par un dosage à l'orthophénantroline sans adjonction de réducteur ou avec adjonction. La plupart des résultats concernant la libération des éléments du mica ont été exprimés en p. 100 d'élément présent dans le minéral. Cette présentation a l'avantage de permettre des comparaisons immédiates entre les divers éléments. Les résultats exprimés en mg d'oxydes sont donnés en annexe 2.

II. — Comportement des éléments chimiques majeurs des micas en présence d'acides organiques (système clos)

A. — *Action chimique globale*

Dans le tableau 3 a été reportée la libération cumulée des différents éléments du mica exprimée en mg/100 mg de minéral. Les valeurs obtenues n'ont qu'une valeur

(1) Laboratoire d'Analyse d'Arras.

TABLEAU 3

Extraction des éléments chimiques de la phlogopite lors de cinq traitements par divers acides en système « fermé »

Chemical elements extracted from phlogopite by five acid treatments in a « closed » system

Groupe	Acides organiques utilisés	pH avant	pH après	Al_2O_3 *	Fe_2O_3*	MgO *	SiO_2 *	K_2O *	ε des éléments extraits **	Evolution des micas
I	Oxalique	3,20	5,90	10,10	13,22	14,80	5,40	16,40	9,62	D
	Citrique	3,48	4,12	12,26	8,10	10,22	4,41	12,60	7,79	D
	Tartrique	3,40	3,65	7,57	6,39	8,38	4,08	12,50	6,40	D
	Salicylique	3,10	—	5,64	10,51	8,29	3,80	9,54	5,87	D
II	Quinique	3,38	—	4,51	6,19	5,63	1,63	9,68	4,01	O
	Lactique	3,35	3,60	4,35	5,54	6,50	2,00	6,72	4,00	O
	Malonique	3,40	—	4,12	5,00	5,57	2,32	8,02	3,96	D
	Formique	3,45	3,51	2,93	3,22	6,38	2,25	7,25	3,79	O
Référence	Acides minér. N/1 000 H_2SO_4	3	3,65	2,02	5,5	4,6	1,99	8,88	3,26	O
	Acides minér. N/1 000 HCl	3	3,60	2,21	6,20	4,8	2,12	8,58	3,53	O
II	Malique	3,53	—	1,81	5,93	3,95	1,45	7,43	2,84	O
	Fumarique	3,35	—	1,89	4,00	3,64	1,45	5,35	2,63	O
	Acétique	3,90	—	1,70	2,35	3,27	1,79	6,82	2,53	O
	Hydroxybenzoïque	3,75	3,80	1,39	3,33	3,44	1,19	7,10	2,38	O
	Vanillique.....	3,80	3,85	1,46	3,30	2,31	1,46	7,20	2,23	O
III	Succinique	3,70	—	0,81	3,19	2,99	0,95	4,17	1,78	O
	Aspartique	3,60	—	1,35	3,20	2,18	0,81	4,16	1,62	N
	Alanine	6,10	6,10	1,19	2,89	1,47	0,38	3,96	1,50	N
	Butyrique	6,10	6,15	1,09	2,28	1,31	0,31	1,76	0,91	N
	Eau			0,1	< 0,1	0,5	0,5	1,7	0,5	N

* Extraction exprimée pour chaque élément en p. 100 de l'élément présent dans le minéral.
** En mg pour 100 mg de minéral.
D = destruction sans ouverture.
O = apparition d'un pic à 14 Å.
N = pas d'évolution apparente.

relative ([2]) mais elles permettent cependant de classer les divers acides utilisés et, en confrontant aux résultats minéralogiques obtenus, de distinguer trois groupes parmi eux :

— ceux provoquant une forte action chimique (5 à 10 p. 100 de libération des éléments et *destruction* du mica) ; ce sont les acides oxalique, citrique, tartrique et salicylique (groupe I) ;

— Onze acides (groupes II) où se retrouvent les acides minéraux et la majorité

([2]) Dans d'autres conditions, et en jouant sur le rapport $\frac{\text{poids de minéral}}{\text{volume de solution}}$, il est possible d'obtenir une destruction beaucoup plus considérable.

des acides aliphatiques et aromatiques. Ces acides provoquent une libération qui intéresse 2 à 5 p. 100 des éléments et une évolution du mica avec transformation ;

— et enfin quatre acides (groupe III) dont l'efficacité est faible (< 2 p. 100 du minéral détruit) et se rapproche de celle de l'eau distillée. Parmi ceux-ci on retrouve en particulier des acides aminés et deux acides gras.

Une certaine disjonction peut apparaître entre les critères chimiques et minéralogiques du classement en ce qui concerne les acides malonique et succinique.

La référence à l'action des acides minéraux de même concentration, qui sont entièrement dissociés mais peu complexants, permet immédiatement de mettre en relation la forte action des acides du groupe I avec un caractère acide et une forte action complexante. Ensuite on peut distinguer un groupe de composés dont l'action est essentiellement acide avec quand même pour quatre d'entre eux une légère action de complexation (acides quinique, lactique, malonique et formique) et enfin le dernier groupe de quatre acides qui ont encore de faibles propriétés acides dans les conditions considérées mais dont l'action se rapproche de celle de l'eau (action essentiellement hydrolytique).

Au niveau de cette action globale des acides N/1 000 sur un mica, on peut voir que les acides complexants ont une action au moins dix fois plus forte que celle de l'eau alors que pour les composés acides peu complexants, le facteur ne serait que de 5 à 8. Au sein des composés acides eux-mêmes, l'action exercée est quantitativement différente d'un facteur de 2 à 3 entre le groupe I complexant et le groupe II acide mais peu complexant.

B. — *Géochimie des différents éléments chimiques en milieu organique*

1. *Aluminium.*

La figure 1 permet de retrouver le classement établi précédemment. Les quatre acides complexants du groupe I ont ici un effet particulièrement net, et trois acides du groupe II (quinique, lactique, malonique) montrent des propriétés complexantes assez nettes par rapport à HCl. Cependant la coupure que nous avons faite est justifiée

TABLEAU 4

Stabilité des composés du fer et de l'aluminium avec les acides organiques en présence de résines cationiques fortes (Dowex 50)

Stability of iron and aluminum compounds with organic acids in presence of strong cationic resins (Dowex 50)

Acide organique	Al		Fe	
	Avant passage *	Après passage *	Avant passage *	Après passage *
Oxalique	140	110	236	90
Citrique	110	110	207	110
Salicylique	110	50	231	25
Tartrique	50	35	118	20
Lactique	20	5	87	5
HCl.....	80	5	184	1

* mg $\times$ 10^{-3} dans 50 ml de solution.

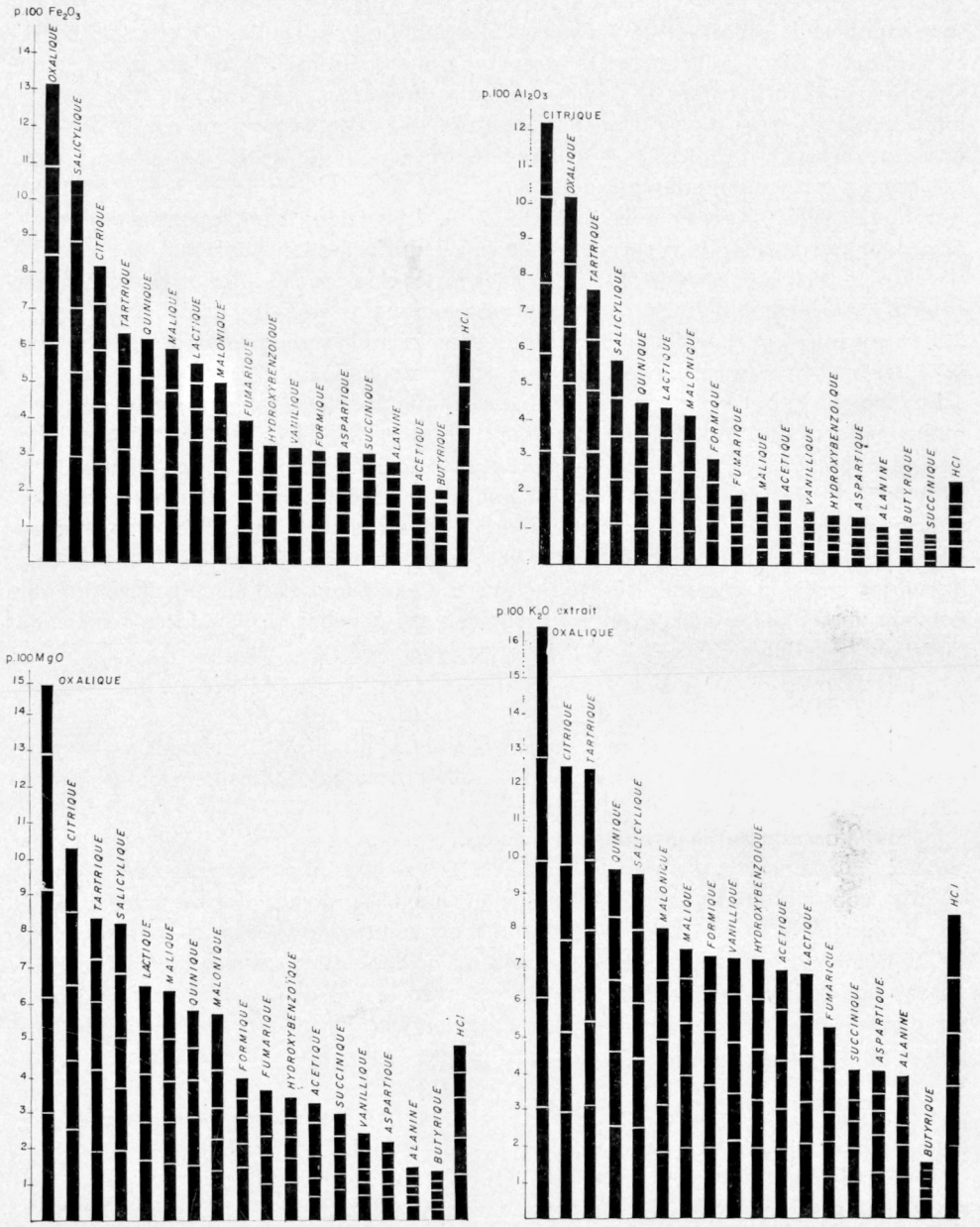


FIG. 1. — *Evolution géochimique de la phlogopite en présence d'acides organiques.*
Système fermé (100 mg mica, 100 ml solution 10^{-3} N — 60 °C),
durée d'un traitement : 4 jours, 5 traitements.

Phlogopite geochemical evolution with organic acids.
Closed system (100 mg mica, 100 ml, 10^{-3} N solution, 60 °C), treatment = 4 days, 5 treatments.

par d'autres arguments. Tout d'abord, si on fait passer les différentes solutions recueillies après l'expérience sur une résine cationique forte (Dowex 40 W), on peut constater (tabl. 4) que seuls les quatre acides oxalique, citrique, tartrique et salicylique

sont capables de préserver cet élément d'une fixation importante. On constate aussi, en étudiant le mica en diffraction X après cinq traitements (tabl. 3), qu'une compétition s'exerce entre l'aluminium en solution sous une forme complexée ou non et la couche interfoliaire du mica où cet élément peut être fixé : cette fixation qui concorde avec une « ouverture » du mica à 14 Å n'intervient que pour les acides peu complexants qui ont en particulier une constante de stabilité avec Al inférieure à 5 (Robert et Razzaghe, 1975 ; Razzaghe et Robert, 1975). Les acides complexants conduisent pour leur part à une destruction du mica sans transformation (tabl. 3).

On peut ainsi considérer que les résines fortes et la couche interfoliaire des minéraux 2/1 permettent d'établir une coupure analogue au sein des acides organiques. Si l'on considère parallèlement à ces résultats la formule semi-développée des acides, on s'aperçoit que se retrouvent dans les acides « complexants » l'acide citrique qui est hydroxylé et polycarboxylique, l'acide oxalique dont les deux carboxyles peuvent aisément former une pince et l'acide tartrique dont les 2 COOH sont séparés par deux groupements OH; l'acide malonique dont les 2 COOH ne sont séparés que par un groupement CH_2 conduit également à une destruction du mica. Les autres acides dicarboxyliques (malique, succinique, fumarique, maléique...) et monocarboxyliques ne forment pas de complexes stables avec Al dans les conditions de nos expériences. Parmi les acides phénols utilisés, le seul acide complexant est l'acide salicylique qui possède un COOH et un OH en position ortho qui peuvent former une pince chelatante sur le cation.

2. *Fer* (fig. 1).

On retrouve les trois mêmes groupes d'acides qui ont pu être définis précédemment avec cependant un certain nombre de différences qui ont trait surtout à l'ordre des acides dans les différents groupes.

Tout d'abord pour le groupe I des acides complexants, on trouve l'ordre: oxalique $>$ salicylique $>$ citrique alors que l'acide citrique se classait en tête pour l'aluminium.

On constate aussi que HCl extrait relativement beaucoup plus de fer (7 p. 100) que d'aluminium (moins de 3 p. 100) et ceci est valable pour tous les autres acides. D'une manière générale, à l'exception des trois acides classés en tête, l'ordre de sortie du fer apparaît beaucoup plus en relation avec le pH des solutions acides. Ceci s'explique dans la mesure où le fer est à l'état ferreux dans la structure de la phlogopite d'où il peut aisément sortir par une simple action acide (Razzaghe et Robert, 1977).

En effet, si on compare (tabl. 5) l'action de ces mêmes acides sur la biotite (Fe^{2+}) et sur une oxybiotite (Fe^{3+}), on peut noter que les quantités de fer extraites diminuent considérablement, dans ce dernier cas, d'un facteur pouvant aller de 2 pour l'acide oxalique à près de 10 pour les composés acides non complexants. On peut d'ailleurs vérifier aussi (tabl. 5) que le fer en solution se trouve en général à l'état ferreux, ce qui veut dire que, dans le cas de la phlogopite et de la biotite, le fer est libéré à l'état ferreux et maintenu sous cet état dans la solution. Dans l'oxybiotite un peu de fer ferrique est certainement libéré et peut-être se trouve-t-il réduit à l'état ferreux par les acides. Seuls les composés les plus complexants, oxalique et citrique, extraient des quantités notables de fer de l'oxybiotite et se montrent capable d'en maintenir également une fraction à l'état Fe^{3+}. Le passage sur des résines montre d'ailleurs que seuls ces deux derniers acides protègent de façon notable (40 à 50 p. 100) le fer d'une fixation

TABLEAU 5

Etat du fer en solution et sa solubilisation à partir de la biotite de Varennes (17,74 p. 100 de FeO et 1,11 Fe_2O_3) *et de la biotite oxydée* (4 p. 100 FeO et 15,36 Fe_2O_3) *par différents acides organiques* (Fe^{2+}, Fe^{3+} et fer total en mg/l — valeur inférieure à 0,1 mg/l)

State of iron in solution and its solubilization from Varennes biotite (17,74 p. 100 FeO and 1,11 Fe_2O_3) *or oxyded biotite* (4 p. 100 FeO and 15,36 Fe_2O_3) *by different organic acids* (Fe^{2+}, Fe^{3+} and total iron in mg/l — value less than 0,1 mg/l)

Acide utilisé	Minéral											
	Biotite						Biotite oxydée					
	Fe_2O_3 (p. 100)	Fe^{+2}	Fe^{+3}	Fe total	Fe^{+2} (p. 100)	Fe^{+3} (p. 100)	Fe_2O_3 (p. 100)	Fe^{+2}	Fe^{+3}	Fe total	Fe^{+2} (p. 100)	Fe^{+3} (p. 100)
Oxalique ..	21,83	3,2	0,58	3,78		15	9,45	1,12	0,47	1,59	70	30
Salicylique.	19,13	3,06	0,10	3,15	85	3	2,36	0,36		0,38	95	—
Citrique ..	15,07	2,65	0,72	3,37	97	21	3,55	0,58	0,14	0,72	81	19
Tartrique .	14,96	1,95	0,14	2,09	79	7	1,59	0,42	—	0,45	93	—
Lactique ..	9,98	1,29	—	1,30	93	—	1,08	0,15	—	0,15	100	—
HCl.....	14,44	2	—	2,06	100 97	—	1,86	0,30	—	0,30	100	—

et forment donc des complexes vrais. Avec tous les autres acides, le fer est sous forme de composé ferreux peu stable, voisin d'un sel, et il est fixé par les résines (tabl. 4).

Notons que si la géochimie du fer ferrique converge avec celle de l'aluminium, seul ce dernier cation peut être refixé au niveau de la couche interfoliaire du mica ouvert. Dans le cas du fer ferreux on constate plutôt une convergence avec le comportement du magnésium.

3. *Magnésium.*

Le magnésium est le cation octaédrique dominant pour la phlogopite. On constate que son extraction en milieu acide est très forte et relativement plus importante que celle du fer et surtout que celle de l'aluminium (fig. 1). Si l'acide oxalique et trois autres acides complexants apparaissent toujours comme les agents d'extraction les plus efficaces, comme dans le cas du fer (ferreux) l'action des composés acides peu complexants est relativement forte. Si on fait passer les solutions après traitement sur une résine cationique forte, pour tous les acides, le magnésium se trouve entièrement retenu sur la résine, ce qui indique que, dans aucun cas, ce cation n'a formé un complexe suffisamment fort pour rester en solution. Ceci coïncide d'ailleurs avec les valeurs faibles trouvées dans la littérature pour les constantes de stabilité avec les acides organiques concernés qui vont de 0,5 (acide acétique) à des valeurs de 2 ou 3 pour les acides lactique, malique et succinique (annexe 1).

Une autre expérience permet de prouver que le mécanisme de sortie de Mg est assez différent de celui de l'aluminium. Le tableau 6 donne les quantités d'éléments libérés pour trois températures différentes (60 °C, 20 °C, 4 °C). On constate que l'ordre d'extraction des éléments change notablement lorsque la température diminue ; en considérant le rapport de l'extraction à 60 °C sur l'extraction à 4 °C, on voit que l'extraction du magnésium est celle qui varie le plus (d'un facteur de 12,5 avec

TABLEAU 6

Influence de la température sur la libération des éléments (phlogopite). Libération en mg d'oxydes
Influence of temperature on elements release (phlogopite) in mg of oxydes

Elément	Acide oxalique N/1 000				Acide hydroxybenzoïque N/1 000		
	t = 60°	t = 20°	t = 4°	Extraction à 60° / Extraction à 4°	t = 60°	t = 4°	Extraction à 60° / Extraction à 4°
Al_2O_3	1,62	1,32	0,84	1,92	0,24	0,10	2,18
MgO	**3,50**	**0,487**	**0,28**	**12,50**	0,81	0,13	6,23
Fe_2O_3.....	0,76	0,559	0,38	2,00	0,19	0,09	2,11
SiO_2	2,18	0,90	0,90	2,42	0,45	0,11	4,09
K_2O	1,61	0,58	0,2	5,55	0,69	0,30	3,29
Σ des éléments extraits	9,67	3,85	2,69		2,38	0,74	

l'acide oxalique) lorsque la température décroît, alors que l'extraction de Al et de Fe varie relativement peu (facteur voisin de 2). Il semble donc que l'on peut faire intervenir pour le magnésium une acidolyse de type classique (réaction dont la vitesse augmente avec la température) alors que pour Al et Fe on peut invoquer la formation de complexe (exothermique) dont la stabilité diminue lorsque la température augmente.

4. — *Silicium* (fig. 2).

L'extraction du silicium est relativement faible si on la compare à celle des autres éléments. Dans les conditions considérées, la silice ne forme aucun complexe ; de plus sa libération n'est pas limitée par une question de solubilité : soit elle se comporte en élément résiduel dans les structures, soit, si la destruction de la structure est importante, elle accompagne les autres éléments en solution.

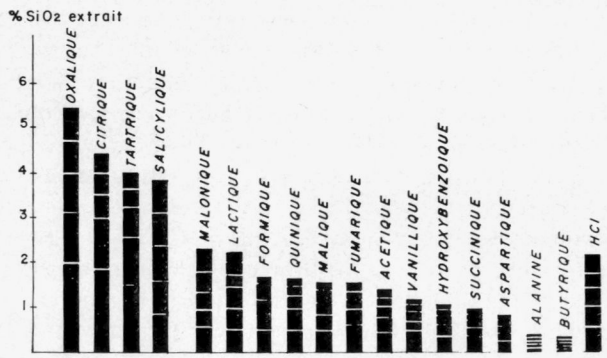


FIG. 2. — *Libération de SiO_2 de la phlogopite par des acides organiques.* Système fermé.
SiO_2 release from phlogopite by organic acids. Closed system.

Dans le tableau 7 sont reportées les valeurs du rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 dans les solutions, comparées à celle de la phlogopite avant traitement.

On s'aperçoit que le propre des acides complexants est de provoquer une sortie préférentielle de Al_2O_3 par rapport à celle de SiO_2.

Si l'on considère le rapport moléculaire (K_1) des solutions, pour les sept premiers acides du tableau, on trouve des valeurs qui se rapprochent de la valeur 2 caractéristique des kaolinites. Ceci pourrait donc expliquer la présence de ces minéraux ou même la formation d'imogolite ($SiO_2/Al_2O_3 = 1$) et de gibbsite dans un certain nombre de sols podzoliques.

TABLEAU 7

Valeurs des rapports $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ *et* $\frac{K_2O}{Al_2O_3}$ *dans les solutions organiques (rapports pondéraux et/ou moléculaires)*

Values of $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ *and* $\frac{K_2O}{Al_2O_3}$ *ratios in organic solutions (ponderal and/or molecular ratios)*

Groupe	Acides organiques utilisés N/1 000	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (en mg)	Rapport moléculaire $\frac{SiO_2}{Al_2O_3} \times 1{,}80$	$\frac{K_2O}{Al_2O_3}$ (en mg)
I	Oxalique	1,17	2,10	1,62
	Citrique	0,79	1,42	1,02
	Tartrique	1,30	2,34	1,65
	Salicylique	1,47	2,65	1,69
II	Quinique	0,79	1,42	2,14
	Lactique	1	1,80	1,54
	Malonique	1,23	2,21	1,95
	Formique	1,69	3,04	2,47
Référence	Acides minér. N/1 000 H_2SO_4 ..	2,16	3,89	4,39
	Acides minér. N/1 000 HCl	2,11	3,80	3,88
II	Malique	1,76	3,17	4,10
	Fumarique	1,69	3,04	1,39
	Acétique	2,31	4,16	4,01
	Hydroxybenzoïque	1,89	3,40	5,10
	Vanillique.....	2,20	3,96	4,96
III *	Succinique	2,57	4,62	5,14
	Aspartique	1,32	2,38	3,08
	Alanine	0,70	1,26	3,32
	Butyrique	3,54	6,37	1,61
	Phlogopite	2,20	3,96	0,58

* Pour le dernier groupe d'acides, les quantités d'éléments libérés deviennent très faibles et on ne peut plus accorder la même importance aux rapports calculés.

Pour les autres acides, le rapport est plus proche de celui trouvé pour les minéraux 2/1.

Evidemment, l'évolution du rapport K_i du minéral soumis à l'altération s'effectue en sens inverse : augmentation du rapport K_i avec enrichissement en SiO_2 pour le cas des acides complexants, et maintien de ce rapport voisin de 4 pour les acides peu complexants.

5. *Potassium.*

Le potassium occupe une position interfoliaire et donc relativement extérieure au réseau micacé. On constate que son extraction est relativement forte et ceci avec pratiquement tous les acides. On peut évidemment penser, dans la mesure où les acides oxalique, citrique et tartrique se classent toujours en tête, que sa libération résulte de la destruction du réseau. Cependant sa forte extraction par de nombreux acides peu complexants nous amène à faire intervenir des phénomènes d'échange avec les H^+ ou les Al^{3+}. Ainsi certains acides comme HCl, formique, hydroxybenzoïque, quinique, vanillique, acétique ou lactique extraient des quantités voisines de 8 p. 100, ce qui représente trois à quatre fois les quantités d'Al extraites.

Un rapport d'extraction K_2O/Al_2O_3 élevé (tabl. 7) coïncide ainsi avec une évolution du mica conduisant à la formation d'un minéral à 14 Å.

mica $\rightarrow$ vermiculite. $Al(OH)_n$ (Robert et Razzaghe, 1975 ; Vicente *et al.*, 1977) .

En résumé, on retrouve donc bien les deux rôles essentiels des composés organiques : rôle complexant des anions, rôle au niveau de l'acidité des protons.

En restant au sein d'un même système expérimental (ici le système clos), il est déjà possible de différencier ces deux mécanismes essentiels de l'altération, en faisant varier la température par exemple. Il apparaît aussi que les composés acides non complexants sont de loin les plus nombreux et que la liste des acides complexants se limite à quatre ou cinq acides.

L'utilisation des résines cationiques fortes permet de distinguer les éléments susceptibles d'être complexés : il s'agit surtout de l'aluminium et éventuellement du fer. La disjonction entre les deux éléments est cependant nette dans la mesure où le fer existera surtout en présence d'acides organiques simples à l'état ferreux ; son comportement sera donc très proche de celui du magnésium qui est entièrement refixé par les résines.

III. — Comportement des éléments chimiques majeurs en système ouvert et comparaison entre les deux systèmes

Les résultats concernent la libération des différents éléments Al-Fe-Mg obtenue en 75 l (fig. 3). On constate évidemment que la destruction du minéral est beaucoup plus considérable que celle obtenue en système fermé où cinq traitements de 100 cm^3 avaient seulement été effectués sur 100 mg de minéral. Mais établir des comparaisons en valeur absolue entre les résultats obtenus dans les deux systèmes peut poser des problèmes théoriques difficiles à résoudre. Aussi devons-nous nous contenter de comparaisons en valeurs relatives. Une des premières constatations que l'on peut

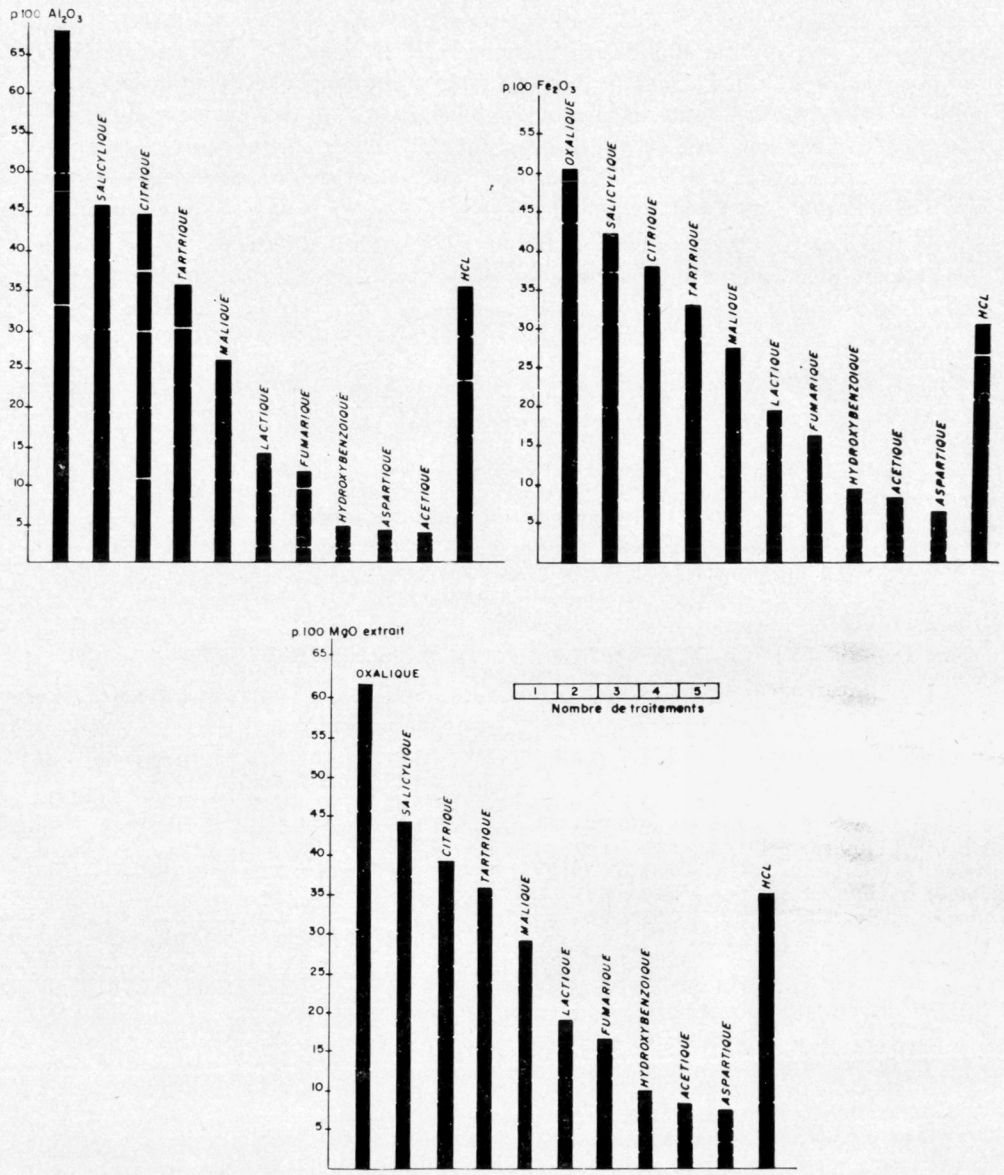


FIG. 3. — *Evolution géochimique de la phlogopite en présence d'acides organiques.*
Système ouvert (400 mg mica, vitesse de percolation 20 ml/h — solutions acides 10^{-3} N à 60 °C).

Phlogopite geochemical evolution with organic acids.
Open system (400 mg mica, percolation rate = 20 ml/h — 10^{-3} N solutions at 60 °C).

faire en considérant les figures 1 et 3 est que la différence entre les acides complexants (groupe I) et les composés acides (par exemple HCl) est beaucoup moins grande et ceci est particulièrement net pour l'aluminium.

Ceci ressort encore beaucoup mieux si l'on établit un rapport R entre la quantité d'élément extraite par chaque acide organique et celle extraite par HCl (acide fort,

dissocié, peu complexant). Si HCl a été choisi comme base de référence, précisons que les résultats seraient semblables en prenant H_2SO_4 ou $HClO_4$. Par rapport à ces composés minéraux, les acides organiques utilisés à même concentration sont forcément moins dissociés ; toute extraction supplémentaire (ou même légèrement inférieure) d'élément constatée en milieu organique peut donc être attribuée à la formation de complexe et cela se traduira alors par une valeur du rapport R supérieure ou pas très différente de l'unité.

1) Considérons tout d'abord (tabl. 8) les résultats concernant la *somme des éléments* les plus aptes à la complexation et qui sont situés en couche tétraédrique (Al) ou octaédrique (Al-Fe-Mg). En système fermé, le rapport a une valeur supérieure à l'unité pour sept acides, en système ouvert pour trois ou quatre.

TABLEAU 8

Extraction comparée par les différents acides des éléments de la phlogopite, en système clos et en système ouvert
R est le rapport des quantités d'élément extrait par l'acide concerné et par HCl
(R > 1 implique l'intervention de complexes)

Comparison of phlogopite elements release by organic acids in a closed and an open system.
R is the ratio of the elements extracted by the acid and by HCl. (R > 1 implies the intervention of a complex)

	R Système clos				R Système percolant				Evolution des micas
	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Σ-Al Fe Mg	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Σ-Al Fe Mg	
Oxalique	4,5	2,13	3,08	4,1	1,89	1,63	1,73	1,78	D
Citrique	5,54	1,30	2,13	3,4	1,25	1,25	1,08	1,17	D
Tartique	3,42	1,03	1,74	2,5	0,99	1,08	0,99	1,00	I
Salicylique	2,55	1,69	1,72	2,4	1,29	1,35	1,22	1,25	I
Quinique	2,04	1,00	1,17	1,6	—	—	—	—	
Lactique	1,96	0,89	1,35	1,7	0,38	0,64	0,53	0,49	O
Malonique	1,86	0,80	1,11	1,5	—	—	—	—	
Formique	1,32	0,52	1,02	0,75	—	—	—	—	
Malique	0,82	0,95	0,82	0,72	0,72	0,89	0,81	0,82	O

D = Destruction.
O = Ouverture (à 14 Å).
I = Ouverture avec interstratifiés 10/14 Å.
— : Non utilisé en système percolant.

Sept acides seulement montrent donc des propriétés complexantes en système fermé et ce nombre diminue notablement en système ouvert pour atteindre 3. De plus, dans ce dernier cas, on constate une chute très importante de la valeur du rapport qui est en général divisée par deux ou plus. Ceci est confirmé par les résultats minéralogiques (tabl. 8) qui montrent qu'en milieu ouvert, seuls les acides oxaliques et citrique « détruisent » les micas. Les autres acides qui provoquaient une destruction en milieu clos, conduisent à la formation d'interstratifié 10-14. La formation de tels minéraux peut être ici interprétée comme une évolution intermédiaire entre la destruction et l'ouverture classique.

2) Si maintenant on considère *chacun des éléments* individuellement, on constate que, en *système fermé*, on a les valeurs de loin les plus élevées avec Al puis Mg et enfin

Fe... pour le rapport R, ce qui pourrait représenter un ordre de complexation décroissante.

En système ouvert, on constate une chute du rapport R pour tous les éléments, chute particulièrement importante pour Al alors que Mg et Fe sont relativement moins touchés.

Ces résultats apparaissent logiques dans la mesure où Al et Mg sont des éléments à configuration de gaz rare où la valence est un facteur important pour l'aptitude à la complexation. Le résultat trouvé pour le fer, qui pourrait paraître étonnant, confirme ceux obtenus antérieurement ; le fer libéré est celui qui se trouve à l'état Fe^{2+} dans le minéral et il reste sous cet état peu complexable en solution, sauf dans le cas de l'acide oxalique qui libère Fe^{3+} et peut former des complexes ferriques (Razzaghe et Robert, 1977).

Les résultats de ces expériences permettent donc de distinguer dans le temps les deux mécanismes essentiels qui agissent lors de la mise en œuvre des composés organiques acides dans l'altération.

Ainsi, un drainage libre a pour conséquence de privilégier le mécanisme le plus rapide qui serait, dans le cas considéré la *dissociation des acides* et l'intervention des protons. En revanche, la formation de complexes apparaît comme un phénomène beaucoup plus lent qui n'a pas le temps de se développer dans le système drainant considéré où seuls les complexes les plus forts peuvent intervenir avec les acides oxalique, salicylique, citrique et éventuellement tartrique.

Conclusion

Les différents résultats obtenus permettent donc de *dissocier* les principaux mécanismes qui se trouvent impliqués dans les processus d'altération par les composés organiques (Razzaghe, 1976).

Comme un certain nombre d'auteurs ont pu le souligner, les *protons* ont le rôle essentiel dans la destruction des structures et la libération des éléments du réseau. L'altération en milieu organique sera donc d'autant plus forte que le pK_A des acides sera plus bas et que leur concentration sera plus forte (Vicente et Robert, 1977). Selon ce critère, l'ordre d'efficacité observé des acides peut être déjà considéré comme normal : aliphatiques $>$ phénols $>$ aminés. Il faut noter que lorsqu'il y a mélange d'acides, ce qui est le cas général dans le milieu naturel, leurs effets s'ajoutent. Cette action de l'acidité va jouer pour tous les acides suffisamment dissociés ; comme il s'agit d'un phénomène rapide, elle se développera même pour des vitesses élevées de percolation des solutions, mais son intensité dépendra d'une façon étroite de la température.

La formation de complexes intervient en revanche, pour un très petit nombre de composés possédant des caractéristiques chimiques spéciales au niveau de leur formule développée : acides aliphatiques polycarboxyliques ou aromatique avec un COOH et un OH très proches (acide salicylique). Ce nombre de composés déjà faible en milieu clos (7), diminue encore lorsque la vitesse de percolation des solutions augmente : seuls alors les acides oxalique et citrique conservent leurs propriétés complexantes si l'on se réfère à un critère minéralogique.

Au niveau du mode d'action de ces composés complexants, tout se passe comme s'ils agissaient plus lentement et dans un deuxième temps, c'est-à-dire après les protons, en provoquant un déséquilibre dans la réaction de sortie des éléments.

Lorsqu'elle a lieu, cette action des complexants vient ajouter ses effets à ceux de l'acidité pour produire ce que l'on appelle l'*acidocomplexolyse* dont l'intensité dans l'altération peut être de trois à cinq fois plus grande que celle de la simple acidité.

Chaque mécanisme a cependant son action spécifique : si l'acidité provoque une sortie plus ou moins congruente de tous les éléments du réseau, la complexation est par contre une source d'incongruence dans la mesure où la sortie des éléments dépend étroitement de leur aptitude à la complexation avec l'ordre

$$Al^{3+} > Fe^{3+} > Fe^{2+} > Mg^{2+}.$$

L'acidité joue donc un rôle primordial dans la géochimie de Fe^{2+} et Mg^{2+} alors que la complexation prend une part essentielle dans celle de Fe^{3+} et Al^{3+}. Dans le cas de ce dernier élément, la présence dans les minéraux 2/1 d'une couche interfoliaire capable de le refixer avec une forte sélectivité comme le feraient des résines échangeuses d'ions, permet d'établir une coupure au sein des acides : ainsi se montrent très complexant vis-à-vis de Al les acides ayant une valeur de la constante de stabilité du complexe $pK_C > 5$.

Il semble bien à ce niveau que la zone interfoliaire des minéraux 2/1 soit une zone de transit privilégiée à la fois pour la pénétration des protons, et pour la sortie de cations comme Mg^{2+} et Al^{3+} ; les phénomènes d'échanges d'ions (avec K des micas ou les autres cations saturant l'argile), et de diffusion joueront donc un rôle important surtout dans le cas de ces minéraux 2/1.

Il est nécessaire de considérer aussi, à côté de ces deux mécanismes essentiels, acidité et complexation, deux autres mécanismes qui sont l'*échange d'ions* et l'*oxydo-réduction*.

Les phénomènes de réduction vont jouer, en ce qui nous concerne, uniquement pour le fer. Lorsque celui-ci est présent à l'état ferreux dans les structures (minéraux trioctaédriques), il va être libéré d'une manière aussi aisé que le magnésium, du fait de la valeur élevée de son pK_A. Là encore les protons ont le rôle essentiel, mais les composés organiques vont en général maintenir ce fer ferreux en solution et faciliter son transport sous cet état. Comme nous l'avons vu précédemment, il semble que seuls les composés les plus complexants (oxalique, citrique) soient capables de former des complexes ferriques stables. Il faut noter aussi que seuls ces composés complexants ont une action notable sur les minéraux ferrifères.

Dans le milieu naturel, il y aura combinaison possible de ces différents mécanismes s'exprimant par des processus pédologiques différents. Cependant, pour qu'il y ait altération, il faut l'intervention de l'acidité. Celle-ci peut agir seule, par exemple, dans les sols bruns acides ; elle peut agir en liaison avec la réduction dans les sols hydromorphes ou avec la complexation dans les sols podzoliques.

Ces différents processus se caractériseront par des évolutions spécifiques, aussi bien géochimiques (comportement de l'aluminium et du fer) que minéralogiques (transformation des minéraux 2/1 ou néogenèse de nouveaux minéraux).

Reçu pour publication en novembre 1979.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier M. Bétrémieux, Directeur de recherches à la Station de Science du sol I.N.R.A. de Versailles et M. Faucherre, Professeur de géochimie à l'Université Paris V, pour l'aide qu'ils ont apportée lors de la rédaction du présent mémoire.

Summary

Geochemistry of the major elements of micas in organic medium : mechanism of silicates weathering

This experimental study deals with the geochemistry of the major elements (Si, Al, Fe, Mg, K) released during trioctahedral micas weathering in an organic medium (acid or acid and complexing). The studies take into account the physico-chemical conditions which may occurs : utilization of the main low molecular weight organic acids which can be present in the soils, pH 3 to 5... Two types of extreme hydrodynamic conditions are concerned : a « closed » system with recurring replacement of solutions and an « open » system with high percolation rate (20 cm^3/hr).

In a first part (closed system) the results about the geochemistry of the major elements are stated and allow to bring forward the main mechanisms of the element release from a phyllosilicate structure.

In a second part the comparison of the results obtained in a closed system with those obtained in an open system allow to distinguish and even to set a hierarchy between the various possible mechanisms occuring in acid organic compound weathering.

Thus the two main mechanisms (proton action, complex formation) occur consecutively :

— acid dissociation is a quick process, which gives to protons the essential and initiating role in structure breakdown and element release,

— complex formation, a slower process, only occurs subsequently on some elements (Al, Fe) already in solution.

According to environmental conditions the preponderant role will be played either by the proton action or by the acid and complexing action with consequential effects on mineralogy and soil formation processes.

Zusammenfassung

Geochemie des wesentlichen Elemente im organischen Milieu

Diese experimentelle Untersuchung betrifft die Geochemie der wesentlichen Elemente (Si, Al, Fe, Mg, K), die beim Abbau der trioctahedrischen Micas in organischen Milieu frei werden (Saeure, oder Saeure und Komplexbildner). Die Untersuchungen erstrecken sich auf physikalisch-chemische Bedingungen wie sie in der natuerlichen Umgebung vorkommen koennen : Verwendung der wichtigsten organischen Saeuren mit niedrigem Molekulargewicht, die in Boeden von pH 3 bis 5 wahrscheinlich anzutreffen sind.

Zwei extreme hydrodynamische Bedingungen werden herangezogen : ein offenes Milieu mit hoher Versickerungsgeschwindigkeit (20 cm^3/h) und ein geschlossenes Milieu mit regelmaessiger Erneuerung der Loesungen.

Im ersten Teil werden die Ergebnisse ueber die Geochemie der wesentlichen Elemente in geschlossenem Milieu dargelegt. Diese ermoeglichen es, die wichtigsten Mechanismen klarzustellen, die an der Freisetzung dieser Elemente von einer Phyllosilikatstruktur ausgehend teilnehmen.

Im zweiten Teil ermoeglicht es die Gegenneberstellung der erzielten Ergebnisse, eine Differenziation vorzunehmen und sogar eine Hierarchie zu schaffen zwischen den verschiedenen Mechanismen, die beider Verwitterung durch organische Saeureverbindungen mitwirken duerften. Die zwei Hauptmechanism (Protontaetigkeit, Bildung der Komplexe) treten also nacheinander auf :

— Die Dissoziation der Saeuren ist ein schneller Vorgang, weshalb die Protonen die wesentliche und veranlassende Rolle in der Zerstoerung der Strukturen und der Freisetzung der Elemente spielen.

— Die Komplexbildung, ein langsamerer Vorgang, tritt erst in zweiter Linie in Aktion und nur auf bestimmten Elementen, die schon in geloester Form vorhanden sind (Al, Fe).

Je nach den Milieubedingungen wird also vorherrschend Saeureaktivitaet auftreten, oder aber ueberwiegend Saeureaktivitaet und Komplexbildung mit Auswirkungen auf mineralogischer Ebene sowie auf die Vorgaenge der Bodenbildung.

РЕЗЮМЕ

Геохщця основных елементов слюд в органической среде.

РАZАГЕ М. К., РОЪЕРТ М.

Настоящее опытное исследование касается геохимии основных элементов (Si, Al, Fe, Mg, К), которые освобождаются при изменении восьмигранных слюд в органической среде/кислота или кислота и агент образования соединения/.

Исследование охватывает физико-химические условия естественной среды : применение основных органических кислот низкого молекулярного веса, которые можно обнаружить в почвах pH з-5.

Рассматриваются два типа крайних гидродинамических условий : открытая среда с высокой скоростью перколяции /20 кубических сантиметров на час/, « закрытая среда » с периодическим возобновлением растворов.

В первой части /закрытая среда/ предъявляются результаты относящиеся к геохимии основных элементов. Они показывают главнейшие механизмы освобождения этих элементов от структуры филлосиликата.

Во второй части сравнение результатов закрытой й открытой сред позволяет установить иерархию между разными механизмами, которые учавствуют в изменении, вызванном органическими кислыми соединениями. Оба главнейших механизма поступают один за другим :

— диссоциация кислот является быстрым явлением и поэтому протоны играют основную и начальную роль в разрушении структур и в освобождении элементов,

— на втором месте находится образование соединения, менее быстрое явление, которое влияет только на некоторые уже растворенные элементы (Al, Fe).

В зависимости от условий среды будут преобладать кисиое действие или кислое действие и агент образования соединения с последствиями в отношении минералогии и процессов педогенеза.

Références bibliographiques

ARVIEU J. C. et CHAUSSIDON J., 1964. Etude de la solubilisation acide d'une illite : extraction du potassium et évolution du résidu. *Ann. agron.* **15** (3), 207-229.

BERTHELIN J., 1976. *Etude expérimentale des mécanismes d'altération des minéraux par des micro-organismes hétérotrophes.* Thèse Doct. Etat Univ. Nancy, 198 p.

BRINDLEY G. W. et YOUELL R. F., 1951. A chemical determination of tetrahedral and octahedral aluminum ions in a silicate. *Acta crystallogr.* 4, 495-496.

BRUCKERT S., 1970. Influence des composés organiques solubles sur la pédogénèse en milieu acide. *Ann. agron.* **21,** 421-452.

FREDERICKSON A. F., 1951. Mechanism of weathering. *Bull. Geol. Soc. Amer.* **62,** 221-232.

GASTUCHE M. C., 1963. Kinetics of acid dissolution of biotite. *Proc. Int. Clay Conf.* Stockholm. Pergamon Press London, 67-83.

HEM J. D., 1960. *Complexes of ferrous iron with tannic acid.* US Geol. Survey water-supply. Paper 1667, A, 64 p.

HUANG W. H. et KELLER W. D., 1970. Dissolution of rock forming silicate minerals in organic acids : simulated first stage weathering of mineral surface. *Amer. Min.* **55,** 2076-2094.

JENNY H., 1941. *Factors in soil formation.* Mc Graw-Hill, New York.

KELLER W. D. et FREDERICKSON A. F., 1952. Role of plants and colloïdal acids in the mechanism of weathering. *Amer. J. Soil Sci.* **250,** 594-603.

LIND C. J. et HEM J. D., 1975. *Effects of organic solutes on chemical reaction of aluminium.* Geol. Survey water supply. Paper 1827, G, 83 p.

MILLER R. J., 1965. Mechanisms for hydrogen to aluminium transformations in clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **29,** 36-39.

MORTENSEN J. L., 1963. Complexing of metals by soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 179-186.

RAZZAGHE M. H., 1976. *Contribution à l'étude expérimentale des phénomènes d'altération en milieu organique acide.* Thèse Doct. d'Etat Univ., Paris VI, 222 p.

RAZZAGHE M. H. et ROBERT M., 1975. Altération des micas et géochimie de l'aluminium : rôle de la configuration de la molécule organique sur l'aptitude à la complexation. *C. R. Acad. Sci. Paris,* **280,** D, 2645-2648.

RAZZAGHE M. H. et ROBERT M., 1977. Dynamique spécifique du fer et des silicates en présence d'acides organiques hydrosolubles. *C. R. Acad. Sci. Paris,* **284,** D, 1143-1146.

RINGBOM A., 1967. *Les complexes en chimie analytique.* Ed. Dunod, Paris, 369 p.

ROBERT M., 1970. Etude expérimentale de l'évolution des micas. *Ann. agron.* **25** (6), 363-399.
ROBERT M. et RAZZAGHE M. H., 1975. Mise en évidence de deux types d'évolution minéralogique des micas trioctaédriques en présence d'acides organiques hydrosolubles. *C. R. Acad. Sci. Paris* **280,** D, 2175-2178.
SCHALSCHA E. B., APPELT M. et SCHATZ A., 1967. Chelation as a weathering mechanism. I. Effect of complexing agents on the solubilization of iron from minerals and granodiorite. *Geoch. and cosmoch. Acta*, **31,** 587-596.
SCHATZ A., CHERONIS N. D., SCHATZ V. et TREIAWNY G. S., 1954. Chelation as a biochemical weathering factor in pedogenis. *Pennsylvanie Acad. Sci. Proc.* **28,** 44-51.
SCHNITZER M. et SKINNER S. I. M., 1963. Organo metallic interactions in soils. *J. Soil Sci.*, **96,** 86-93.
SILLEN L. G. et MARTELL A. E., 1964. *Stability constants of Metal-Ion complexes*. Publ. 17. The chemical society Burlington House. London, 754 p.
STEVENSON F. J. et ARDAKANI M. S., 1972. *Organic reactions involving micronutrients in soils. Micronutrients in Agriculture*. Proc. Symp. Muscle Shoals, Alabama, 1971. *Soil. Sci. Soc. Amer.*, Madison USA, 666 p.
STICHER H. et BACH R., 1966. Fundamental in the chemical weathering of silicates. *Soils and fertilizers*, **29** (4), 321-325.
VICENTE M. A. et ROBERT M., 1977. Influence de la concentration en acide organique sur l'altération des micas. Aspects quantitatif et qualitatif. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **284,** D, 511-514.
VICENTE M. A., RAZZAGHE M. H. et ROBERT M., 1977. Formation of aluminium hydroxy vermiculite (intergrade) and smectite from mica under acidic conditions. *Clay Min.* **12,** 101-112.

ANNEXE 1

Valeurs des constantes de stabilité des complexes pour Al^{3+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}
d'après Sillen et Martell (1964) et Ringbom (1967)
Toutes les valeurs sont les logarithmes des constantes

Complex stability constants for Al^{3+}, Fe^{2+}, Fe^{3+} and Mg^{2+} from Sillen and Martell (1964) and Ringbom (1967). Values expressed in log

Acides	Al^{3+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Mg^{2+}
Oxalique	$K_1 = 7,26$ $K_2 = 4,85$	$K_1 = 3,05$ $\beta_2 = 5,15$	$K_1 = 7,54$ $\beta_2 = 14,59$ $\beta_3 = 20,0$	$K_1 = 2,7$ à $3,4$
Citrique	AlHL K = 7,0 AlL K = 20,0	$K_1 = 4,4$	$K_1 = 18,4$	
Tartrique	$K_1 = 6,3$	$K_1 = 2,24$	$K_1 = 6,43$ $\beta_2 = 11,86$	$K_1 = 1,36$ à $7,9$
Salicylique	$K_1 = 14,11$	$K_1 = 6,5$	$K_1 = 16,3$	$K_1 = 2,64$
Malonique	$K_1 = 5,24$ $K_2 = 4,16$	$K_1 = 2,8$	$K_3 = 2,67$	$K_1 = 2,40$ à $2,85$
Lactique	$K_3 = 4,06$		$K_1 = 6,4$-$7,1$	$K_1 = 1,3$ à $1,4$
Malique	$K_1 = 3,3$	$K_1 = 2,5$-$2,7$	$K_1 = 12,8$ à 25	$K_1 = 1,55$
Maléique	$K_1 = 3,2$	$K_1 = 2,5$	$K_1 = 7,1$	
Acétique		$K_1 = 1,40$	$K_1 = 3,2$	$K_1 = 0,5$ à $0,8$
Formique		$K_1 = 3,1$		
Succinique			$K_1 = 6,88$	$K_1 = 1,20$

ANNEXE 2

Eléments chimiques libérés de la phlogopite lors de cinq traitements en milieu clos (exprimés en mg/100 ml)

Phlogopite chemical elements release during five treatements in a closed medium (mg/100 ml)

Acides (N/1 000)	pH		Al_2O_3	FeO	MgO	SiO_2	K_2O	Somme
	avant	après						
Oxalique	3,20	5,90	1,76	0,70	3,49	2,07	1,6	9,62
Citrique	3,48	4,12	2,14	0,40	2,40	1,65	1,20	7,79
Tartrique	3,40	3,65	1,32	0,32	1,97	1,56	1,20	6,40
Salicylique	3,10	—	0,99	0,55	1,95	1,45	0,93	5,87
Quinique	3,38	—	0,79	0,32	1,33	0,62	0,95	4,01
Lactique	3,35	3,60	0,75	0,29	1,53	0,77	0,66	4,00
Malonique	3,40	—	0,72	0,26	1,31	0,89	0,78	3,96
Formique	3,45	3,51	0,51	0,18	1,52	0,86	0,72	3,79
H_2SO_4	3	3,65	0,35	0,26	1,07	0,75	0,85	3,26
HCl	3	3,60	0,38	0,32	1,15	0,81	0,86	3,53
Malique.....	3,53	—	0,31	0,32	0,93	0,55	0,73	2,84
Fumarique	3,35	—	0,33	0,21	0,86	0,56	0,58	2,63
Acétique	3,90	—	0,30	0,12	0,77	0,67	0,67	2,53
Hydroxybenzoïque ..	3,75	3,80	0,24	0,18	0,82	0,45	0,69	2,38
Vanillique	3,80	3,85	0,25	0,17	0,54	0,56	0,71	2,23
Succinique	3,70	—	0,14	0,16	0,71	0,36	0,41	1,78
Aspartique	3,60	—	0,23	0,16	0,51	0,31	0,41	1,62
Alanine	6,10	6,10	0,21	0,15	0,35	0,14	0,40	1,25
Butyrique	6,10	6,15	0,19	0,12	0,31	0,12	0,17	0,93
Eau	—	—	0,1	—	0,12	0,19	0,16	0,48

Ann. agron., 1979, **30** (6), 513-527.

Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture

I. — Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée

B. MARY et J. C. RÉMY

Station agronomique de l'Aisne, I.N.R.A., Rue Fernand-Christ, 02011 Laon

Résumé

Une méthode d'incubation au laboratoire (Stanford et Smith, 1972) a été appliquée à un ensemble de sols cultivés, dans le but de déterminer leur potentiel de minéralisation en azote.

Les échantillons de sol en incubation sont lessivés périodiquement, de sorte que, l'azote minéral ne peut s'accumuler comme en conditions naturelles. Les cinétiques de minéralisation obtenues, très régulières, comportent deux phases :

— un régime transitoire qui va de $t = 0$ à $t = 14$ jours, où les phénomènes liés au séchage et au stockage du sol, d'une part, à la présence de résidus organiques peu décomposés, d'autre part, dominent ;

— un régime permanent s'établit ensuite, où la minéralisation de la matière organique humifiée est prédominante. La nitrification est très rapide, l'azote NH_4^+ échangeable est à l'état de traces. Cette phase se poursuit encore après 7 mois d'incubation, sans que le plafond de minéralisation soit atteint.

Celui-ci (N_0) peut être calculé en supposant que la cinétique de minéralisation est une réaction du premier ordre :

$$N = N_0 (1 - e^{-kt}) .$$

Les incubations de courte durée (3 à 4 semaines) ne permettent pas de déterminer séparément N_0 et k, mais leur produit kN_0 ; kN_0 représente alors une vitesse initiale de minéralisation et constitue un indice de pouvoir minéralisateur du sol.

Les quantités d'azote minéralisées au champ en 1977, estimées par la technique du bilan, sont corrélées significativement ($r = 0{,}77^{***}$) avec cet indice. Par contre, elles ne sont pas corrélées avec les quantités d'azote minéralisées pendant les 14 premiers jours d'incubation, qui ne sont donc pas représentatives de la minéralisation nette au champ. L'indice kN_0 s'avère une bonne mesure du potentiel de minéralisation brute du sol en azote.

I. — Introduction

La maîtrise de la nutrition azotée des cultures nécessite une connaissance approfondie du système correspondant au cycle interne de l'azote du sol. La nature des mécanismes, les agents responsables sont en général bien connus, mais il manque souvent les éléments nécessaires à une approche quantitative des problèmes.

La prévision de la fertilisation azotée par la technique des bilans portant sur l'azote minéral tend maintenant à se développer. Toutefois, dans cette optique de prévision, il manque souvent un terme important dès que l'on envisage une généralisation. Il s'agit des quantités d'azote organique d'origines diverses qui peuvent contribuer à l'alimentation azotée des végétaux. Nous tenterons, dans ce travail, d'en donner les éléments nécessaires au plan quantitatif. Nous séparerons, dans la mesure du possible, la part due à la matière organique humifiée à évolution lente, de celle à attribuer aux résidus de culture, racines ou parties aériennes enfouies, dont le rôle est souvent sous-estimé. Nous envisagerons successivement l'étude de la minéralisation en supposant les facteurs du milieu à leur optimum puis, dans une seconde partie, nous ferons une approche quantitative des phénomènes de réorganisation.

La production d'azote minéral dans un sol cultivé pendant la période de croissance de la plante se situe généralement en deçà d'un seuil que nous appellerons « potentiel de minéralisation » en azote. Ce potentiel ne s'exprime que partiellement au champ en raison des facteurs du milieu qui sont limitants. Si les lois d'action de quelques-uns de ces facteurs, comme la température, l'humidité, l'aération, les alternances humectation-dessiccation, sont maintenant bien connues (Miller et Johnson, 1964 ; Van Schreven, 1967 ; Collier, 1969 ; Agarwal *et al.*, 1971 ; Stanford *et al.*, 1973 ; Stanford et Epstein, 1974 ; Cavalli et Rodriguez, 1975 ; Myers, 1975 ; ...), il n'en est pas de même pour le « potentiel de minéralisation » du sol ainsi défini.

En effet, les techniques de fractionnement de la matière organique du sol ne permettent pas encore d'individualiser un compartiment qui serait responsable de l'essentiel de la minéralisation de l'azote. De nombreuses tentatives dans ce sens n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants (Keeney et Bremner, 1964, 1966 ; Freney et Simpson, 1969 ; Kardigamathaiyah et Mac Kenzie, 1970 ; Osborne, 1977 ; Guiraud et Fardeau, 1977 ; ...).

Selon Bremner (1965), les tests biologiques d'incubation sont plus satisfaisants que les tests chimiques. De bonnes corrélations ont été obtenues par Stanford *et al.* (1973) entre l'azote absorbé par des cultures sous serre et un test d'incubation au laboratoire (Stanford et Smith, 1972). Nous nous sommes inspirés de cette technique en comparant les résultats du test modifié avec les quantités minéralisées au champ en 1977 dans une trentaine de situations.

II. — Matériel et méthodes

A. — *Les sols*

Les sols proviennent du réseau expérimental « Prévision de la fumure azotée du blé d'hiver » de l'ITCF (1) en 1977. Les échantillons de sol ont été prélevés en février 1978 sur une épaisseur de 20-25 cm. Ils sont ensuite séchés à l'air pendant 48 h et tamisés à 2 mm. Les sols sont originaires en majeure partie du Nord du Bassin parisien et sont homogènes par leur environnement climatique, leur texture, leur système cultural. Leurs caractéristiques figurent au tableau 1.

(1) Institut Technique des Céréales et Fourrages.

TABLEAU 1

Caractéristiques des sols étudiés
Characteristics of the soils

Sol n°	Classe de texture	Analyse chimique	
		C organique ($g.kg\ sol^{-1}$)	N total ($g.kg\ sol^{-1}$)
1	Limon moyen	11,0	1,17
2	Limon moyen	9,8	1,04
3	Limon moyen	9,4	0,96
4	Limon moyen	9,1	0,96
5	Limon moyen	9,0	1,00
6	Limon moyen	8,9	0,93
7	Limon moyen	8,7	0,95
8	Limon moyen	8,1	0,90
9	Limon moyen	7,9	0,88
10	Limon moyen	7,7	0,82
11	Limon moyen sableux	10,7	1,17
12	Limon moyen sableux	9,8	1,09
13	Limon moyen sableux	9,7	1,07
14	Limon moyen sableux	9,1	0,99
15	Limon moyen sableux	8,3	0,87
16	Limon sableux	8,6	0,96
17	Limon sablo-argileux	8,4	1,07
18	Limon argilo-sableux	10,9	1,26
19	Limon argileux	10,6	1,16
20	Limon argileux	10,5	1,36
21	Limon argileux	9,6	1,03
22	Sable limoneux	13,5	1,35
23	Sable argileux	8,3	0,89
24	Argile limoneuse	15,0	1,51
25	Argile limoneuse	12,0	1,60
26	Argile limoneuse	7,5	1,00
27	Calcaire limoneux	20,4	2,54
28	Calcaire limoneux	12,6	1,34
29	Limon calcaire	12,4	1,58
30	Limon calcaire	11,8	1,39

B. — *La méthode d'incubation*

Elle est celle de Stanford et Smith (1972) légèrement modifiée :

— 15 g de sol mélangés à 15 g de sable (0,5 à 2 mm) sont placés dans des allonges de diamètre intérieur 30 mm. Les sols sont humectés au temps $t = 0$ à une humidité égale à 65 p. 100 de leur capacité de rétention en eau, c'est-à-dire à une humidité inférieure à celle préconisée par Stanford afin de favoriser la nitrification. L'humidité est contrôlée deux fois par semaine. La température est de 35 °C ;

— les allonges sont périodiquement lessivées avec 200 ml de $CaCl_2$ M/100 au lieu de 100 ml pour obtenir une extraction complète des nitrates ;

— le dosage de l'azote minéral extrait ($N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3$) est fait par colorimétrie en flux continu. Les nitrates sont déterminés par la méthode de Griess après réduction au sulfate d'hydrazine. L'ammonium est dosé par la réaction de Berthelot ;

— l'azote minéral contenu dans les échantillons sacrifiés en fin d'incubation est extrait après agitation avec 100 ml de KCl 0,5 M. Quelle que soit la date de prélèvement, les ions NH_4^+ échangeables sont toujours présents en quantité inférieure à 1,0 mg N/kg sol.

C. — *L'incubation avec incorporation de racines*

Des racines de moutarde (fin floraison) sont isolées par tamisage dans l'eau. Les racines sont finement hachées et incorporées au sol (sol séché ou frais) à l'état frais ou après avoir été séchées à l'air pendant 24 h. L'ensemble est placé en incubation selon la technique précédemment décrite.

D. — *La méthode de calcul de l'azote minéralisé au champ*

Au lieu d'utiliser directement le rendement des témoins sans azote comme seul critère d'appréciation de la minéralisation au champ, nous avons préféré estimer celle-ci d'après un calcul de bilan tel qu'il est pratiqué pour la prévision de la fumure azotée du blé par Rémy et Hébert (1977) :

$$R_{90} + N + M_s + M_r = Y.\alpha_n$$

R_{90} : reliquat d'azote minéral mesuré vers le 15 février sur 90 cm.
N : fumure azotée ($N = 0$ dans le cas étudié).
M_s : azote organique humifié minéralisé du 15 février à la maturité du blé.
M_r : azote des résidus du précédent cultural minéralisé du 15 février à la maturité du blé.
Y : rendement obtenu.
α_n : quantité d'azote prélevée par tonne de grain produit (25 à 30 kg/t selon le niveau de production du témoin sans azote).

$$M_s = Y.\alpha_n - R_{90} - M_r . \qquad (1)$$

III. — Résultats et discussion

A. — *Analyse de la cinétique de minéralisation*

La minéralisation de l'azote a été suivie (fig. 1) pendant 7 mois sur trois sols : un sol calcaire de Champagne, un sol sableux riche en matière organique du Laonnois, un sol limoneux du Soissonnais. La reproductibilité de la technique est excellente. Le coefficient de variation est en moyenne de 5 p. 100 sur les quantités cumulées.

De 0 à 14 jours, il se libère une quantité considérable d'azote minéral, puis la vitesse de minéralisation diminue lentement et régulièrement. A $t = 200$ jours, la vitesse est deux à trois fois plus faible qu'à $t = 30$ jours.

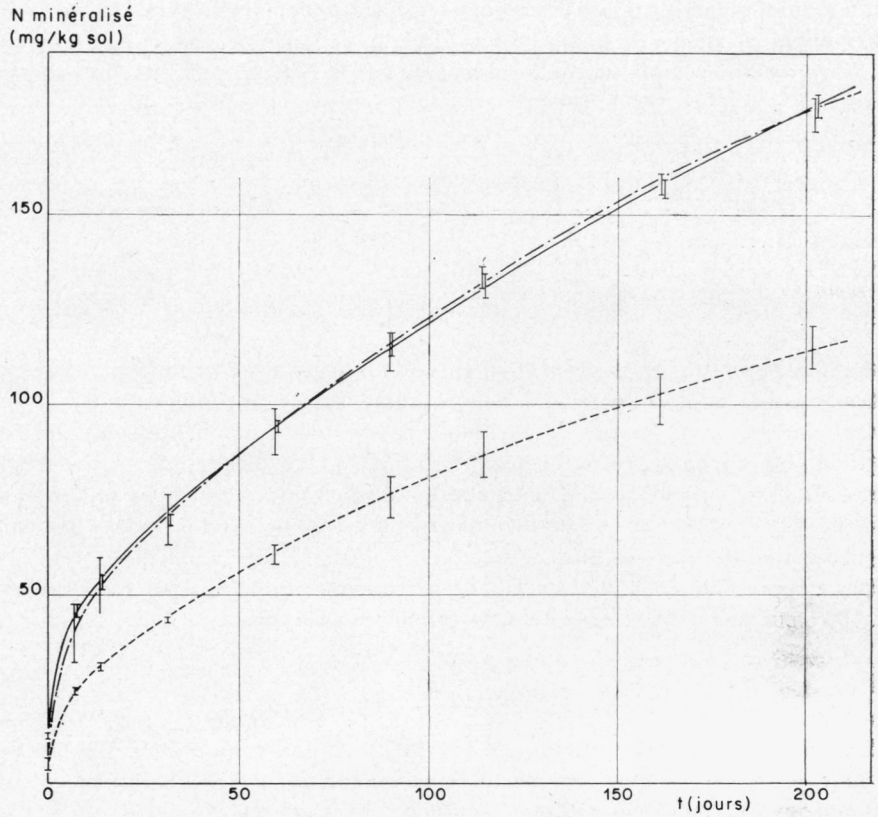


FIG. 1. — *Minéralisation de l'azote dans trois types de sols.*
Nitrogen mineralization in three types of soils.

———— sol calcaire (calcareous soil).
—·—·— sol sableux (sandy soil).
- - - - - - - sol limoneux (loamy soil).

Comme l'ont fait remarquer Stanford et Smith (1972), la minéralisation qui a lieu à partir de t = 14 jours obéit à une cinétique du premier ordre :

$$\frac{d(N_0 - N)}{dt} = -k(N_0 - N) \qquad \text{soit} \qquad N = N_0(1 - e^{-kt})$$

N : quantité cumulée d'azote minéralisé à l'instant t (mg N/kg de sol).
N_0 : quantité maximum d'azote minéralisable au « azote potentiellement minéralisable ».
k : constante de vitesse (semaine^{-1}).
t : temps (semaines).

La technique d'ajustement graphique utilisée par Stanford et Smith (1972) pour estimer les paramètres N_0 et k est criticable (Campbell, 1978). Nous lui avons préféré un ajustement aux moindres carrés non linéaire par la méthode de Newton (Demidovitch et Maron, 1973). Cette technique numérique a l'avantage d'accorder le même

poids à tous les points alors que l'ajustement après changement de variable, numérique ou graphique, privilégie les points les plus éloignés de l'origine. Cet effet de « lissage » est à l'origine de la faible variabilité observée sur k. Nos propres résultats sont plus différenciés :

	N total (mg N/kg sol)	N_0 (mg N/kg sol)	k (semaine^{-1})	Demi-vie (années)
sol calcaire	1 350	229	0,028 8	0,46
sol limoneux.....	810	127	0,039 8	0,33
sol sableux	1 630	224	0,030 3	0,44

Le modèle utilisé fait la séparation entre deux fractions d'azote organique : une fraction passive ou très lentement minéralisable (azote organique total — N_0), et une fraction active (N_0) de petite taille. Nous retrouvons le modèle proposé par Jansson (1958). N_0 représente respectivement 17,0, 15,7, 13,7 p. 100 de l'azote total des sols considérés. Il faut remarquer que les constantes de vitesse sont assez faibles et par conséquent l'asymptote N_0 est atteinte lentement, même en conditions très favorables à la minéralisation comme dans le test : en 6 mois, l'azote minéralisé pour le sol limoneux représente 65 p. 100 de N_0. En extrapolant, nous aurions respectivement 87 p. 100 en un an et 98 p. 100 en 2 ans de conditions optimales.

B. — *La phase transitoire* (0 *à* 14 *jours*)

Le modèle exponentiel proposé n'a pas été ajusté aux deux premiers points de la courbe (t = 7 et t = 14 jours). En effet, il se produit en début d'incubation ce que nous conviendrons d'appeler une « *extraminéralisation* » (« flush effect » des Anglo-Saxons). Ce phénomène a été observé par de nombreux auteurs (Birch, 1958 ; Van Schreven, 1967 ; Argawal *et al.*, 1971 ; Sørensen, 1974 ; Powlson *et al.*, 1976) ; il s'ajoute à la minéralisation « normale » de la matière organique et pourrait intervenir à chaque changement brutal des conditions expérimentales. L'extraminéralisation peut être attribuée au séchage du sol et à la présence de résidus organiques frais en voie de décomposition rapide. L'expérience décrite en 1C a été réalisée afin de quantifier la part respective de chaque phénomène. Le tableau 2 fait apparaître les résultats suivants :

1. *Le séchage du sol seul* (sans racines).

Il provoque une forte extraminéralisation très rapide. Celle-ci est terminée en 7 jours puisque la différence (1) — (2) reste stable à partir de t = 7 jours. Son intensité est de 18,7 mg d'azote/kg sol pour le sol calcaire et 11,0 mg pour le sol limoneux. La contribution de cette extraminéralisation à la minéralisation totale représente respectivement 52 p. 100 et 41 p. 100 au bout de 7 jours d'incubation et 41 p. 100 et 29 p. 100 après 14 jours d'incubation, ce qui est considérable pour des tests d'incubation de courte durée que l'on risque ainsi de mal interpréter.

Campbell a passé en revue les phénomènes pouvant expliquer cette extraminéralisation (1978). Parmi ceux-ci, la minéralisation des cellules autolysées à la suite du séchage à l'air représente probablement la contribution majeure à l'extraminéralisa-

TABLEAU 2

Influence du prétraitement séchage et de l'incorporation de racines sur l'azote minéralisé
Effect of soil drying and roots addition on nitrogen mineralization

	Sol calcaire (calcareous soil)				Sol limoneux (loamy soil)			
	7 j (7 days)	14 j (14 d.)	21 j (21 d.)	28 j (28 d.)	7 j (7 d.)	14 j (14 d.)	21 j (21 d.)	28 j (28 d.)
(1) sol séché (dried soil) ...	34,7 *	46,3	54,5	61,6	26,9	38,6	47,9	53,3
(2) sol frais (fresh soil)	16,6	27,4	36,1	42,3	15,9	27,4	37,2	42,4
(3) sol séché + racines séchées ** (dried soil + dried roots)	21,4	33,3	42,1	49,6	14,5	22,3	29,3	34,6
(4) sol frais + racines fraîches ** (fresh soil + fresh roots)	7,0	17,9	26,2	32,1	7,4	17,3	24,7	30,3
(1)-(2)	18,1	18,9	18,4	19,3	11,0	11,2	10,7	10,9
(4)-(2)	— 9,6	— 9,5	— 9,9	— 10,2	— 8,5	— 10,1	— 12,5	— 12,1

* Moyenne de trois répétitions mg N.kg sol^{-1}.
** Apport de 2,8 g de racines par kg de sol. Teneur en azote des racines : 0.57 p. 100.
(1)-(2) : représente l'extraminéralisation due au séchage.
(4)-(2) : représente l'extraminéralisation (immobilisation) due aux racines.

tion. Les travaux de Jager et Bruins (1975), Marumoto *et al.* (1974, 1977) appuient cette hypothèse. Ces derniers auteurs ont montré aussi que l'azote minéralisé initialement provient principalement du cytoplasme bactérien. L'extraminéralisation que nous avons observée représente environ 15 p. 100 de la biomasse du sol calcaire et 20 p. 100 de celle du sol limoneux, les biomasses ayant été estimées selon la méthode de Jenkinson et Powlson (1976).

2. *L'incorporation des racines.*

Elle provoque un ralentissement de la minéralisation nette, en raison de l'immobilisation d'azote provoquée par l'apport d'un substrat riche en carbone (C/N = 74). Dans une expérience précédente, nous avions observé au contraire une minéralisation accrue après l'incorporation de jeunes racines d'orge dont le rapport C/N était beaucoup plus faible (C/N = 19) et qui contenaient encore beaucoup d'azote nitrique. Ici, l'apport de racines provoque une immobilisation assez importante, plus marquée sur le sol séché que sur le sol frais. Cette immobilisation dure environ 1 semaine pour le sol calcaire et 2 ou 3 semaines pour le sol limoneux (tabl. 2). Malgré la grande quantité de racines incorporées dans l'expérience (l'équivalent de 10 t de matière sèche racines par ha), l'extraminéralisation (ou immobilisation) due aux résidus organiques reste d'intensité plus faible que l'extraminéralisation due au séchage.

C. — *Calcul des paramètres N_0 et k avec des incubations de plus courte durée*

La minéralisation de l'azote a été suivie pendant 108 jours sur les sols nos 1 à 15 et pendant 57 jours sur les quinze autres sols. Les percolations ont été pratiquées aux dates suivantes : t = 0, 14, 31, 57, 84 et 108 jours.

La détermination des paramètres k et N_0 séparément s'avère impossible, même avec une durée d'incubation de 108 jours. En effet, ces paramètres ne peuvent être calculés avec une précision raisonnable que si l'on dispose d'un nombre suffisant de points expérimentaux, ce qui nécessite des durées d'incubation supérieures à 4 mois.

Si l'on fait une hypothèse sur l'un des paramètres, il devient possible de calculer l'autre pour des incubations rapides. C'est le résultat auquel sont arrivés Stanford *et al.* (1974) qui ont supposé que la constante de vitesse k est invariable selon les sols.

TABLEAU 3

Valeurs caractéristiques d'azote minéralisé en incubation
Characteristic values of the nitrogen mineralized during incubation

N° sol	$N_{14} - N_i^*$ (1) (mg N.kg sol^{-1})	$N_{31} - N_i^*$ (2) (mg N.kg sol^{-1})	kN_0 (mg N.kg sol^{-1}.sem^{-1})
1	32,5	51,1	7,98
2	33,7	51,9	7,81
3	34,2	57,1	9,82
4	31,5	50,9	8,32
5	30,6	53,4	9,78
6	30,3	52,3	9,44
7	32,0	51,0	8,15
8	24,5	40,9	7,04
9	28,7	43,8	6,48
10	23,6	36,2	5,41
11	32,3	50,7	7,89
12	28,6	51,1	9,65
13	29,2	44,5	6,56
14	33,2	50,8	7,55
15	30,9	46,9	6,86
16	32,1	49,8	7,59
17	28,4	42,3	5,96
18	34,4	48,4	6,01
19	33,7	49,3	6,69
20	35,7	54,1	7,89
21	27,8	46,8	8,15
22	39,0	54,5	6,65
23	31,7	53,4	9,29
24	42,3	60,2	7,68
25	38,3	58,0	8,45
26	29,1	44,3	6,52
27	54,8	84,2	12,61
28	46,2	61,7	6,65
29	36,3	55,1	8,07
30	21,9	36,3	6,18

* Azote minéral initial (initial mineral nitrogen).
(1) Azote minéralisé de 0 à 14 jours (nitrogen mineralized during the first two weeks).
(2) Azote minéralisé de 14 à 31 jours (nitrogen mineralized between the 14th and 31 th day).

Cette hypothèse nous semble très criticable aussi n'avons-nous pas tenté de calculer les valeurs de N_0 et k sur les trente sols étudiés.

Par contre, le produit kN_0 apparaît intéressant à prendre en compte parce qu'il représente la vitesse initiale de minéralisation hors extraminéralisation. En effet, un développement au second ordre de la fonction $N = N_0(1 - e^{-kt})$ donne :

$$N = N_0 \left(kt - \frac{k^2 t^2}{2}\right) .$$

En se limitant au premier ordre, nous avons : $kN_0 \simeq \frac{N}{t}$. kN_0 est donc une bonne approximation de la quantité d'azote qui se minéralise par semaine en début d'incubation (hors extraminéralisation). La date $t = 14$ jours étant prise comme origine, $N_{31} - N_{14}$ représente l'azote minéralisé entre 14 et 31 jours d'incubation. Cette quantité peut s'écrire :

$$N_{31} - N_{14} \simeq N_0 \left(kt - \frac{k^2 t^2}{2}\right) \qquad \text{où} \qquad t = \frac{31 - 14}{7} = 2{,}43 \text{ semaines}$$

$$N_{31} - N_{14} \simeq kN_0\, t \left(1 - \frac{kt}{2}\right).$$

Dans le terme correctif du second ordre $\left(1 - \frac{kt}{2}\right)$, k a été pris égal à 0,033 sem^{-1} (valeur moyenne obtenue sur les trois sols étudiés précédemment). Par conséquent :

$$kN_0 = 0{,}429(N_{31} - N_{14}) . \qquad (2)$$

Les indices kN_0 qui figurent au tableau 3 ont été calculés d'après cette équation. L'utilisation des valeurs N_{57}, N_{84}, N_{108}, permet de calculer kN_0 avec une précision accrue. Les valeurs kN_0 ainsi calculées sont peu différentes des valeurs calculées d'après l'équation (2). Une durée d'incubation d'un mois apparaît donc suffisante pour déterminer l'indice kN_0 du sol.

D. — *Comparaison avec les résultats obtenus au champ en* 1977

Le calcul de M_S selon l'équation (1) figure au tableau 4. Il existe une forte corrélation entre M_S et kN_0 pour vingt-cinq sols. Cependant, cinq sols ont été exclus de la corrélation :

— les sols n°s 6, 10 et 17 pour lesquels le calcul donne une valeur de M_S négative. En fait, ces sols ont eu une disponibilité d'azote minéral pléthorique (reliquats supérieurs à 160 kg/ha). Ces situations offraient une réponse négative à la fumure azotée et le résultat cultural n'est donc pas le reflet de l'azote en tant que facteur limitant ;

— les sols n°s 27 et 29 : il s'agit de rendzines blanches de Champagne dont la couche labourée présente un potentiel de minéralisation élevé (très élevé pour le n° 27). Les rendements sont faibles. La discordance observée peut provenir de la lenteur de réchauffement de ces sols à albedo élevé.

Pour les vingt-cinq sols restants, la corrélation est hautement significative ($r = 0{,}77$ ***, fig. 2). Il est à noter que la variable rendement est corrélée significativement ($r = 0{,}48$ *) avec l'indice kN_0, mais cette liaison est beaucoup plus lâche qu'avec la variable M_S.

TABLEAU 4

Calcul de M_S (azote minéralisé au champ, sous culture de blé, en 1977)

Calculation of M_S (nitrogen mineralized from soil organic nitrogen during wheat crop, in 1977, under field conditions)

N° sol	Rendement (*Yield*) ($t.ha^{-1}$)	Reliquat R_{90} $N\text{-}NO_3$ (*Remainder Rq*) ($kg.ha^{-1}$)	Précédent cultural (*Preceding crop*) (1)	M_r (2) ($kg.ha^{-1}$)	M_s ($kg.ha^{-1}$)
1	6,26	125	BE	+ 20	46
2	5,41	109	ME	0	48
3	3,62	35	B	— 15	106
4	7,05	71	H	+ 40	113
5	5,77	58	BE	+ 20	93
6	6,26	192	P	+ 15	— 16
7	6,72	142	MG	— 15	83
8	5,06	100	L	0	44
9	4,98	104	B	— 15	52
10	5,72	162	BE	+ 20	— 13
11	5,77	67	ME	0	104
12	5,30	19	BE	+ 20	114
13	4,20	22	BE	+ 20	71
14	4,57	29	BE	+ 20	77
15	3,26	56	BC	0	27
16	4,93	40	BC	0	99
17	5,25	211	B	— 15	— 45
18	5,52	86	C	+ 25	50
19	3,43	58	ME	0	30
20	4,70	54	BE	+ 20	57
21	5,29	85	L	0	67
22	2,15	13	MG	— 15	56
23	6,09	74	BE	+ 20	90
24	4,43	37	BE	+ 20	64
25	4,46	18	C	+ 25	79
26	1,87	0	T	+ 15	32
27	3,10	34	BE + BC	+ 10	34
28	3,40	38	BE	+ 20	29
29	3,67	105	MG	— 15	6
30	3,39	71	ME	0	16

(1) Précédents : BE : Betterave (verts enfouis) ; BC : Betterave (verts consommés) ; B : Blé (pailles enfouies) ; ME : Maïs ensilage ; MG : Maïs grain ; C : colza (pailles enfouies) ; L : Lin ; P : Pomme de terre ; T : Tournesol ; H : Haricots. (Preceding crops = BE : Sugar beets (residues ploughed in) ; BC : Sugar beets (residues used up) ; B : Wheat (straw ploughed in) ; ME : Corn for ensilage ; MG : Corn for grain ; C : colza (straw ploughed in) ; P : Potato ; T : Sunflower ; H : Beans).

(2) Les valeurs de M_r sont celles généralement adoptées par les organismes de développement (non publiées). M_r = (Nitrogen mineralized from the preceding crop residues).

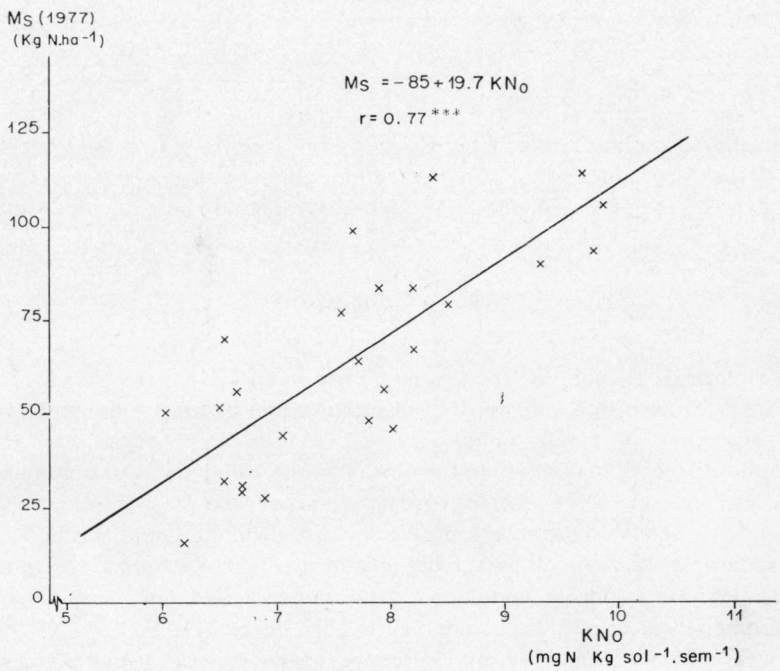


FIG. 2. — *Relation entre l'azote minéralisé au champ en* 1977 *et l'indice* kN_0.
Relation between nitrogen mineralized in field conditions in 1977 *and the index* kN_0.

La variable ($M_s + M_r$) est également moins bien corrélée avec l'indice kN_0 ($r = 0{,}70$ ***) que la variable M_s. L'indice kN_0 doit être relativement indépendant du précédent cultural. En effet, la minéralisation des résidus de récolte *in situ* est déjà commencée au moment du prélèvement de l'échantillon de sol (fin février) et elle se poursuit au laboratoire pendant les 14 premiers jours d'incubation qui ne sont pas pris en compte dans le calcul de kN_0. Compte tenu de ce que nous avons observé précédemment, la minéralisation des racines et des résidus de récolte est négligeable par rapport à celle de la matière organique humifiée, après 14 jours d'incubation au laboratoire. Cela justifie le choix de la variable expliquée M_s et la valeur de l'indice kN_0 pour apprécier le potentiel minéralisateur.

Le coefficient de corrélation entre M_s et ($N_{14} - N_i^*$) (azote minéralisé de 0 à 14 jours) et entre M_s et ($N_{31} - N_i$) (azote minéralisé de 0 à 31 jours) est respectivement de 0,005 et de 0,35 ($n = 25$). Ces résultats montrent :

— que l'azote minéralisé initialement n'est pas représentatif du potentiel minéralisateur de la matière organique humifiée du sol. Les quantités ($N_{14} - N_i$) sont par contre fortement corrélées avec le taux de carbone organique du sol ($r = 0{,}84$ ***, $n = 30$), et avec leur biomasse ($r = 0{,}82$ ***, $n = 15$) mesurée sur quinze sols par la méthode Jenkinson et Powlson (1976) ;

* Ni = N minéral initial.

— que l'azote minéralisé de 0 à 31 jours après séchage du sol n'est pas non plus un bon indice du pouvoir minéralisateur du sol. Les tests classiques d'incubation d'un mois (Drouineau et Lefèvre, 1949), s'ils ont une signification agronomique globale (Lefèvre et Hiroux, 1958), ne peuvent valablement représenter le potentiel de minéralisation du sol au sens où nous l'avons défini, car ils ne prennent pas en compte la part de l'extraminéralisation. La fluctuation annuelle des résultats est d'ailleurs attribuée aux résidus de récolte et à la biomasse issue de leur décomposition.

IV. — Conclusion

La méthode d'incubation choisie, très reproductible, permet de caractériser le stock d'azote minéralisable du sol (N_0) et sa constante de vitesse de dégradation (k). Malheureusement, la détermination séparée de ces deux paramètres exige une très longue durée d'incubation (au moins 4 mois) ou/et de nombreux lessivages. L'incubation pourrait être avantageusement raccourcie (2 à 3 semaines) si l'on acceptait de ne déterminer que kN_0 et si le sol était incubé à l'état frais. Si le stockage est indispensable, la congélation semble être la meilleure technique de conservation car elle n'influe pas sur les quantités d'azote minéralisées ultérieurement (Gasser, 1958 ; Campbell *et al.*, 1971). La meilleure date de prélèvement du sol devrait se situer en fin d'hiver, au moment ou l'influence des résidus culturaux et racinaires est moins importante.

A notre avis, cette méthode caractérise le *pouvoir de minéralisation brute* du sol. En effet, la proportion d'azote minéralisé qui se réorganise pendant l'incubation ne peut être que faible car :

- les lessivages répétés empêchent toute accumulation importante d'azote minéral,
- l'azote minéralisé est nitrifié très rapidement. Or, la forme $N\text{-}NO_3$ est moins vite utilisée par la biomasse hétérotrophe que la forme $N\text{-}NH_4$ (Simon-Sylvestre, 1960),
- le sol ne reçoit aucun apport énergétique ; au contraire, le lessivage élimine les matières organiques solubles (vite dégradables) formées.

La mesure de l'aptitude des différents sols à immobiliser l'azote minéral en présence de substrats carbonés (exsudats racinaires, résidus racinaires et microbiens) devrait permettre de pouvoir apprécier avec une bonne précision les *potentialités de minéralisation nette* du sol.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la liaison Enseignement-Recherche (Ministère de l'Agriculture — DGRST).

Les échantillons nous ont été fournis par le Service Expérimentation de l'ITCF. Nous tenons à remercier cet organisme, en particulier MM. Langlet et Viaud. Nous sommes également très reconnaissants à R. Morel et S. Bourgeois (Chaire de Science du Sol, Institut National Agronomique à Grignon) de leurs conseils. Nous remercions enfin G. Lefèvre et E. Triboï (respectivement, stations d'agronomie INRA d'Amiens et de Clermont-Ferrand) pour les critiques qu'ils nous ont formulées.

Summary

Evaluation of the nitrogen availability of some arable soils

I. — Signification of kinetics of soil organic matter mineralization

A biological method of laboratory (Stanford et Smith, 1972) has been applied to an homogeneous system of arable soils, to determine their nitrogen supplying abilities.

The soil samples are leached periodically during the incubation, so that mineral nitrogen does not accumulate, like under field conditions. The mineralization-kinetics is composed of two regimes :

— a transient regime which goes from $t = 0$ to $t = 14$ days ; during this period, the nitrogen mineralization mainly results in the drying and storage of the soil sample, and in fresh organic residues decomposition ;

— a continuous regime takes place after ; the mineral nitrogen is released particularly from the humified organic matter, and is nitrified very quickly. This regime goes on after 7 months of incubation, without reaching the limit of mineralization.

The latter (N_0) can be calculated assuming the mineralization obeys a first order kinetics : $N = N_0(1 - e^{-kt})$.

The short-term incubations (3 or 4 weeks) do not provide sufficient information to determine both N_0 and k, but only their product kN_0 ; then kN_0 represents the initial rate of mineralization and an index of nitrogen availability.

The nitrogen mineralization has been calculated under field conditions in 1977 according to the balance-sheet technique. It is highly correlated ($r = 0{,}77$ ***, $n = 25$) with the index kN_0. However, it is not correlated with the nitrogen mineralized during the first two weeks of incubation. A better assessment of the net nitrogen availability in soil now requires an investigation of the nitrogen immobilizing ability of the soil.

Zusammenfassung

Beurteilungsversuch der Mineralisierungsfähigkeit des Stickstoffs der Böden von Grosskulturanlagen

I. — Signifikanz der Mineralisierungskinetiken

Es wurde eine Laborinkubationsmethode (Stanford und Smith, 1972) auf ein Komplex landwirtschaftlich angebauter Böden angewandt mit dem Ziel deren Stickstoffmineralisierungspotential zu bestimmen.

Die Bodenproben in Inkubation werden periodisch ausgewaschen damit, wie unter natürlichen Bedingungen, der mineralische Stickstoff sich nicht ansammeln kann. Die erreichten, sehr regelmässigen Mineralisierungskinetiken beinhalten zwei Phasen :

— ein Ubergangsregime welches von $t = 0$ bis $t = 14$ Tage geht, während dem einerseits die an die Trocknung und Lagerung gebundene Vorgänge und anderseits die Anwesenheit schlecht zersetzter organischer Rückstande vorherrschen,

— es bildet sich sodann ein ständiges Regime während dem die Mineralisierung des zu Humus zersetzten Stoffes vorherrschend ist. Die Nitrifikation schreitet sehr schnell voran, der auswechselbare Stickstoff NH_4^+ ist Spurenartig vorhanden. Diese Phase schreitet noch nach siebenmonatiger Inkubation weiter, ohne dass die Höchstgrenze der Mineralisierung erreicht sei.

Diese (N_0) kann berechnet werden mit Annahme dass die Mineralisierungskinetik eine Reaktion ersten Ranges sei :

$$N = N_0(1 - e^{-kt}) .$$

Die kurzdauernden Inkubationen (3 bis 4 Wochen) erlauben nicht N_0 und k separat zu bestimmen, dagegen jedoch deren Produkt kN_0. kN_0 stellt sodann eine Anfangsgeschwindigkeit der Mineralisierung dar und bildet eine Kennzahl der Mieralisierungsfähigkeit des Bodens.

Die, während dem Jahre 1977 im Feld, mittels der Bilanztechnik abgeschätzten Stickstoffmengen sind signifikant mit dieser Kennzahl korreliert ($r = 0{,}77$ ***). Dieselben sind jedoch nicht korreliert mit den, während der ersten 14 tägigen Inkubation mineralisierten Stickstoffmengen, die somit nicht für die reine Mineralisierung im Felde typisch sind. Die Kennzahl kN_0 erweisst sich als gut anwendbar zur Bruttomessung des Stickstoffmineralisierungspotentials des Bodens.

РЕЗЮМЕ

Опыт оценки способности хорошо возделываемых почв минерализировать их азот

I значение кинетик минерализации.

МАРИ Ъ., РЕМИ Ж. К.

Метод инкубации в лаборатории (Станфорд и Смит 1972) применялся к совокупности окультуренных почв для определения потенциала минерализацин их азота.

Образчики инкубируемых почв периодически промывались, чтобы их минералъный азот не мог накопляться, как это происходит в природных условиях. Полученные, очень регулярные кинетики минерализации, насчитывают две фазы :

— переходной режим от t = 0 до t = 14 дней, при котором господствуют явления связанные с сушением и хранением почвы, с одной сторонй, и с присутствием плохо разложившихся органических остатков, с другой

— постоянный режим, устанавливающийся затем, с преобладанием минерализации органического гумифицированного вещества, очень быстрой нитрификацией и присутствием только слепов обменного азота NH_4. Фаза эта длктся еще после 7-ми месяцев инкубации, но минерализация не достигает при этом своего плафона.

Плафон этот может быть найден с помощью рассчета, если допустить что кинетика минерализации является раекцией первой степени : $N = N_0 (1 - e^{-ut})$.

Краткосрочные инкубации (3-4 недели) не позволяют отдельно определить N_0 и к, но дают возможность определения их произведения к N_0 представляющее в этом случае начальную скорость минерализации и являющееся показателем минерализирующей способности почвы.

Количества азота, минерализированного в поле в 1977-м году, и оценивавшиеся методом баланса, находятся в показательной корреляции ($r = 0{,}77^{***}$) с этим показателем. И, напротив, у них не существует корреляции с количествами азота минерализированными в течении первых дней инкубации, которые не могут поэтому быть показательны для чистой минерализации в поле. Показатель к N_0 годится для измерения потенциала валовой минерализации азота в почве.

Références bibliographiques

ARGAWAL A. S., SINGH B. R., KANEHIRO Y., 1971. Soil nitrogen and carbon mineralization as affected by drying-rewetting cycles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **35,** 96-100.

BIRCH H. F., 1958. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and soil.* **10,** 9-31.

BREMNER J. M., 1965. Nitrogen availability indexes. In « *Methods of soil analysis* », ASA Madison II, 1324-1345.

CAMPBELL C. A., BIEDERBECK V. O., WARDER F. G., 1971. Influence of simulated fall and spring conditions on the soil system. II. — Effect on soil nitrogen. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **35,** 480-483.

CAMPBELL C. A., 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In « *Soil organic matter* », Schnitzer and Khan, Elsevier, ch. 5, 224-225 et 254.

CAVALLI I., RODRIGUEZ J., 1975. Effect of moisture in nitrogen mineralization of nine soils of Santiago Provincia. *Cienca e Investigacion Agraria,* **2,** 101-111.

COLLIER D., 1969. *Essai de synthèse sur la cinétique de la minéralisation de l'azote humique des sols et application.* Mémoire INRA Clermont-Ferrand.

DEMIDOVITCH B., MARON I., 1973. *Eléments de calcul numérique.* Ch. XIII. Ed. MIR, Moscou.

DROUINEAU G., LEFÈVRE G., 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.* **19,** 518-536.

FRENEY J. R., SIMPSON J. R., 1969. The mineralization of nitrogen from some organic fractions in soils. *Soil Biol. Bioch.* **1,** 241-251.

GASSER J. K. R., 1958. Use of deep-freezing in the preservation and the preparation of fresh soil samples. *Nature* **181,** 1334-1335.

GUIRAUD G., FARDEAU J. C., 1977. Organisation et minéralisation de l'azote dans le sol. Etude au moyen de 15 N. *Ann. Agron.* **28,** 361-378.

JAGER G., BRUINS E. H., 1975. Effects of repeated drying at different temperatures on soil organic matter decomposition and characteristics, and on the soil microflora. *Soil Biol. Bioch.* **7,** 153-159.

JANSSON S. L., 1958. Tracer studies on nitrogen transformations in soil with special attention to mineralization-immobilization relationship. *Kungl. Lantbruk. Ann.* **24,** 101-361.

JENKINSON D. S., POWLSON D. S., 1976. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. V. — A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Bioch.* **8,** 209-213.

KADIRGAMATHAIYAH S., Mac KENSIE A. F., 1970. A study of soil organic fraction and correlation with yield response of sudan-sorghum hybrid grass on Quebec soils. *Plant and Soil*, **33,** 120-128.

KEENEY D. R., BREMNER J. M., 1964. Effect of cultivation on the nitrogen distribution in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **28,** 653-656.

KEENEY D. R., BREMNER J. M., 1966. Characterization of mineralizable nitrogen in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **30,** 714-719.

LEFÈVRE G., HIROUX G., 1958. Essai de bilan de la production d'azote minéral d'un sol en place. *Ann. agron.* **9,** 23-50.

MARUMOTO T., KAI H., YOSHIDA T., HARADA T., 1974. Contribution of microbial cells and their cell walls to the accumulation of soil organic matter decomposable on drying. *J. Sci. Soil Man.*, **45,** 239-246.

MARUMOTO T., KAI H., YOSHIDA T., HARADA T., 1977. Chemical fractions of organic nitrogen in acid hydrolysates given from microbial cells and their cell wall substances and characterization of decomposable soil organic nitrogen due to drying. *Soil Sci. Plant Nut.* **23,** 125-134.

MILLER R. D., JOHNSON D. D., 1964. The effect of soil moisture tension on carbon dioxyde evolution, nitrification and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **28,** 644-648.

MYERS R. J. K., 1975. Temperature effects on ammonification and nitrification in a tropical soil. *Soil biol. Bioch.* **7,** 83-86.

OSBORNE G. J., 1977. Chemical fractionation in six soils from Southern New South Wales. *Aust. J. Soil Res.*, **15,** 159-165.

POWLSON D. S., JENKINSON D. S., 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. II. — Gamma irradiation, autoclaving, air-drying and fumigation. *Soil Biol. Bioch.* **8,** 179-188.

RÉMY J. C., HÉBERT J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C. R. Acad. Agr. France*, **63,** 700-714.

SIMON-SYLVESTRE G., 1960. L'enfouissement des pailles dans le sol. Etude générale et répercussion sur la microflore du sol. *Ann. agron.* **11,** 5-54 et 117-219.

SØRENSEN L. H., 1974. Rate of decomposition of organic matter in soil as influenced by repeated air drying-rewetting and repeated additions of organic material. *Soil Biol. Bioch.* **6,** 287-292.

STANFORD G, EPSTEIN E., 1974. Nitrogen mineralization-water relations in soils. *Soils Sci. Soc. Amer. Proc.* **39,** 103-107.

STANFORD G., FRERE M. H., SCHWANINGER D. H., 1973. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.* **115,** 321-323.

STANFORD G., LEGG J. O., SMITH S. J., 1973. Soil nitrogen evaluations based on nitrogen mineralization potentials of soils and uptake of labeled and unlabeled nitrogen by plants. *Plant and Soil.* **39,** 113-124.

STANFORD G., SMITH S. J., 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **36,** 465-472.

VAN SCHREVEN D. A., 1967. The effect of intermittent drying of a calcareous soil on carbon and nitrogen mineralization. *Plant and Soil* **26,** 14-32.

Ann. agron., 1979, **30** (6), 529-551.

Un modèle d'action des techniques culturales sur le blé

I. — Principe et premiers résultats sur une variété cultivée dans un domaine expérimental

Martine OLLIVIER et P. MALET

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I.N.R.A.,
84140 *Montfavet*

Résumé

Dans les modèles agrométéorologiques de prévision des rendements, la prise en compte des facteurs culturaux et techniques consiste généralement en une simple description statistique de l'évolution des rendements en fonction du temps. Le développement de modèles explicites de l'action de ces facteurs est une voie certaine d'amélioration de la prévision ; on en donne ici le principe et les premiers résultats obtenus en station expérimentale.

A partir de l'analyse des composantes du rendement sur une série de 25 années d'observations, on propose un modèle de l'action de la fumure azotée et du précédent cultural sur le blé. Qu'il soit utilisé seul ou en association avec un modèle climatique, ce modèle, dit « technologique », a des performances prédictives supérieures à celles d'un simple ajustement linéaire des rendements en fonction du temps.

Les conditions nécessaires pour transposer ce résultat à une échelle régionale ou nationale sont discutées : qualités des données agrotechniques, forme des modèles.

Introduction

Les rendements des cultures dépendent à la fois du climat et du contexte agronomique et technique. L'un des problèmes majeurs à résoudre lors de l'élaboration d'un modèle agrométéorologique est de prendre en compte simultanément ces deux groupes de facteurs et leurs interactions.

Des relevés météorologiques de longue durée et de densité spatiale correcte existent maintenant dans beaucoup de pays. Aussi les modèles d'action du climat sur les plantes, fondés sur des relations statistiques entre les rendements et les variables climatiques sont nombreux. Mais faute de données statistiques équivalentes, les effets des facteurs agronomiques et techniques sont beaucoup moins étudiés. Ces facteurs sont pourtant à l'origine de l'amélioration significative des rendements que l'on observe dans à peu près toutes les régions du monde, surtout depuis trente ans.

A de véritables modèles d'action des facteurs agronomiques et culturaux, la plupart des auteurs substituent donc une description de la progression des rendements au moyen d'une fonction du temps. La loi la plus utilisée (Thompson, 1969 ;

Williams *et al.*, 1975 ; Brochet *et al.*, 1976 ; etc...) est une simple progression linéaire ($R_t = at + b$) qui définit pour chaque année (t) l'équivalent d'un rendement technologique potentiel (R_t). Les constantes a et b caractérisent donc l'évolution des techniques agronomiques de la région considérée mais sans expliciter pourquoi ni comment.

Bien sûr, ce type de description peut être amélioré en introduisant un terme quadratique du temps (ct^2), lorsque la progression des rendements fléchit dans les dernières années de la série (Thompson, 1976), ou bien en distinguant des sous-régions et pour chacune, plusieurs lois successives de progression des rendements (Pitter, 1977). Mais toutes ces descriptions temporelles sont à la merci d'un changement de tendance. Nelson et Dale (1978*b*) montrent que la simple substitution de la fumure azotée à la variable temps suffit pour améliorer nettement la fiabilité d'un modèle agrométéorologique. Il est donc intéressant, dès que possible, d'expliciter l'action des techniques agronomiques dans les modèles. En France, le Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (S.C.E.E.S.) du Ministère de l'Agriculture procède chaque année depuis 1962 à des enquêtes précises sur ces facteurs pour la production des céréales. Ce fichier comporte quatre-vingt-quatre variables qui décrivent, département par département, les conditions culturales du blé. Il a maintenant une taille suffisante pour que l'on puisse envisager l'élaboration d'un véritable modèle « technologique » du blé pour les principales zones productrices françaises.

Avant d'entreprendre une tâche aussi vaste, il est souhaitable d'en tester l'intérêt et de mettre au point la démarche sur des données à la fois moins abondantes et plus analytiques. En effet, au niveau d'une région, il est difficile de distinguer les facteurs réellement agissant de ceux qui ne le sont qu'en apparence, du fait de leurs liaisons statistiques avec les précédents. Par contre, dans les stations expérimentales, les facteurs agrotechniques sont contrôlés, enregistrés et généralement indépendants les uns des autres : on se trouve donc dans les meilleures conditions pour déterminer les facteurs qui agissent réellement sur les rendements.

La présente étude a pour objectif d'élaborer, pour une variété de blé (Etoile de Choisy) cultivée dans une station expérimentale, un modèle technologique explicitant les actions de la fumure et du précédent cultural. On montrera ainsi l'intérêt des données relatives à l'assolement qui, en plus des doses d'engrais, sont disponibles dans les statistiques agricoles départementales.

Bien sûr, le modèle obtenu sera comparé à la « description temporelle » des rendements, en examinant : (i) les deux séries de rendements technologiques potentiels obtenus, (ii) puis les prévisions fournies par l'un et l'autre lorsqu'ils sont intégrés dans un modèle agrométéorologique classique utilisant la régression multiple sur les variables climatiques.

1. — Les données

Il s'agit des résultats d'une série d'essais variétaux de blé tendre réalisés par la station d'Amélioration des Plantes de Montpellier sur le domaine de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier de 1950 à 1957, puis au domaine de Lavalette depuis 1958 (ce changement de lieu correspond à un déplacement de quelques kilomètres sans que les conditions de milieu varient notablement). Il s'agit d'essais blocs ou de lattices balancés à six répétitions ; la surface parcellaire est de 10 m^2 ; la surface de comptage du peuplement est de 0,50 m^2.

De ces essais, nous avons retenu la variété témoin, Etoile de Choisy, qui représente la plus longue série chronologique : 28 années, de 1950 à 1978 (1954 manque), pour lesquelles on dispose (cf. annexe) :

— de notations culturales : date et densité de semis, niveaux de fumure N.P.K. et (à partir de 1958) précédent cultural ;

— d'observations phénologiques : dates de début tallage, début montaison, épiaison, floraison et récolte ;

— de mesures du rendement et de deux de ses composantes : nombre d'épis par m^2 et poids de mille grains.

Le nombre de grains par épi n'est pas noté dans les essais, mais on remarquera qu'il est calculable à partir des deux autres composantes du rendement (nombre d'épis et poids des grains) et du rendement lui-même :

$$\text{Nbre grains/épi} = \text{Rendement (q/ha)} \times 10^4/(\text{Nbre épis/m}^2 \times \text{P 1000 (g)}) .$$

Les observations phénologiques nous permettent de dater approximativement les principales étapes du cycle végétatif. Pour des semis effectués en règle générale dans la première quinzaine de Novembre, le tallage débute dans la première décade de janvier, la montaison dans la première quinzaine de mars, l'épiaison a lieu d'une façon très constante fin avril début mai, la floraison 4 à 5 jours après et la récolte après la première décade de juillet (fig. 1).

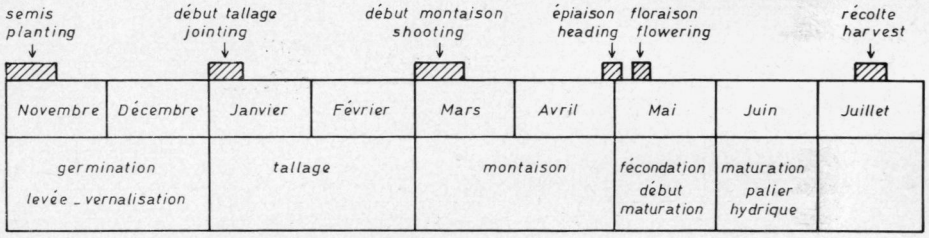


FIG. 1. — *Calendrier phénologique du blé Etoile de Choisy à Montpellier.*
Time evolution of phenological stages for wheat variety « Etoile de Choisy » in Montpellier.

Le fait que les grandes étapes du développement commencent généralement en début de mois justifie l'utilisation d'un pas de temps mensuel dans les deux modèles climatiques que nous élaborerons pour évaluer l'intérêt d'un modèle technologique explicite.

2. — Analyse de l'évolution des rendements

2.1. — *Description temporelle*

2.11. *Des rendements.*

La méthode consiste à décrire l'action des facteurs techniques par un simple ajustement statistique des rendements observés Y_i par rapport aux rangs ($i = 1, ..., n$) des n années dont on dispose. Cet ajustement : $R_i = a.i + b$ fournit un rendement R_i

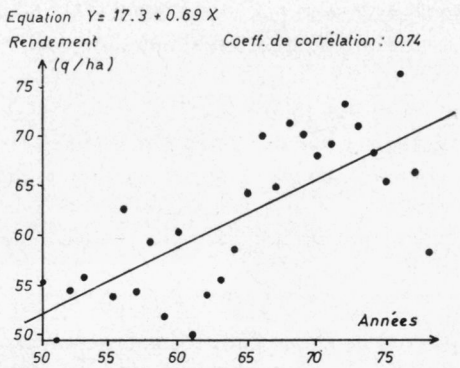


FIG. 2. — *Ajustement linéaire de l'évolution des rendements au cours du temps pour la période* 1950-1978.
Equation de régression et coefficient de corrélation.
Linear adjustment of yield evolution with time for the 1950-1978 *period.*
Regression equation and correlation coefficient.

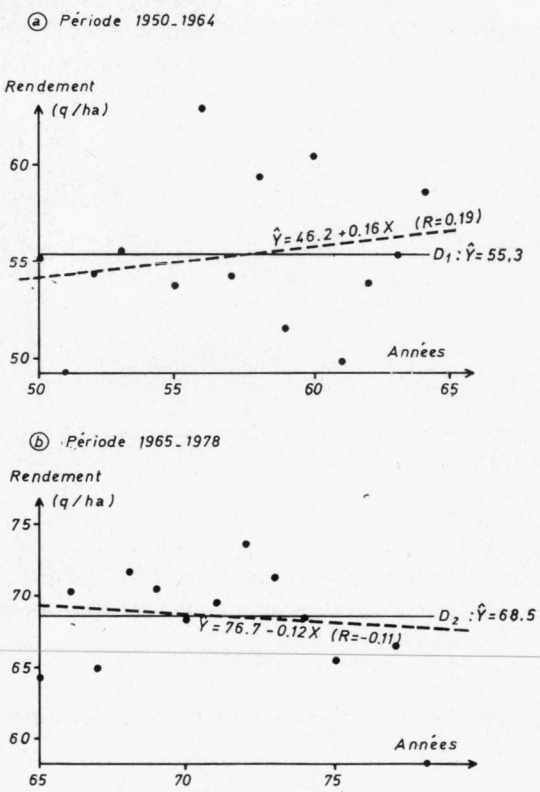


FIG. 3. — *Double ajustement de l'évolution des rendements au cours du temps*
(périodes 1950-1964 *et* 1965-1978)
—— par des droites parallèles à l'axe du temps et passant par le point moyen
---- par les droites de régression en fonction du temps.
Two types of adjustments of yield evolution with time for the periods 1950-1964 *and* 1965-1978.
—— by parallel lines to time axis and including mean point
---- by the regression lines.

appelé souvent Rendement théorique (Gerbier, 1976). Sur nos données, on obtient, pour des rendements exprimés en q/ha et des rangs variant de 50 à 78 :

$$R_i = 0{,}69\ i + 17{,}3$$

avec un coefficient de corrélation de 0,74 (fig. 2). Mais cette progression linéaire, quoique apparemment justifiée par un coefficient de corrélation très significatif, n'est pas satisfaisante. En effet, l'observation de l'évolution des rendements montre un saut à partir de 1965. Il semble donc préférable de considérer deux périodes, l'une de 1950 à 1964, l'autre de 1965 à 1978.

Si l'on fait une régression des rendements en fonction du temps pour chacune des sous-périodes, il n'apparaît aucune tendance significative (fig. 3). Par contre un ajustement de chaque sous période par une droite parallèle à l'axe du temps en passant par son point moyen (Cf. fig. 3 droites D_1 et D_2) se justifie : tandis que la régression linéaire unique explique 55 p. 100 de la variance initiale, le double ajustement (qui a strictement le même nombre de degrés de liberté) en explique 70 p. 100. D'autre part, la distribution des écarts relatifs $(Y_i - R_i)/Y_i$ entre rendement observé et rendement théorique (fig. 4) est beaucoup moins dispersée (et plus symétrique) pour l'ajustement à deux droites que pour la régression unique.

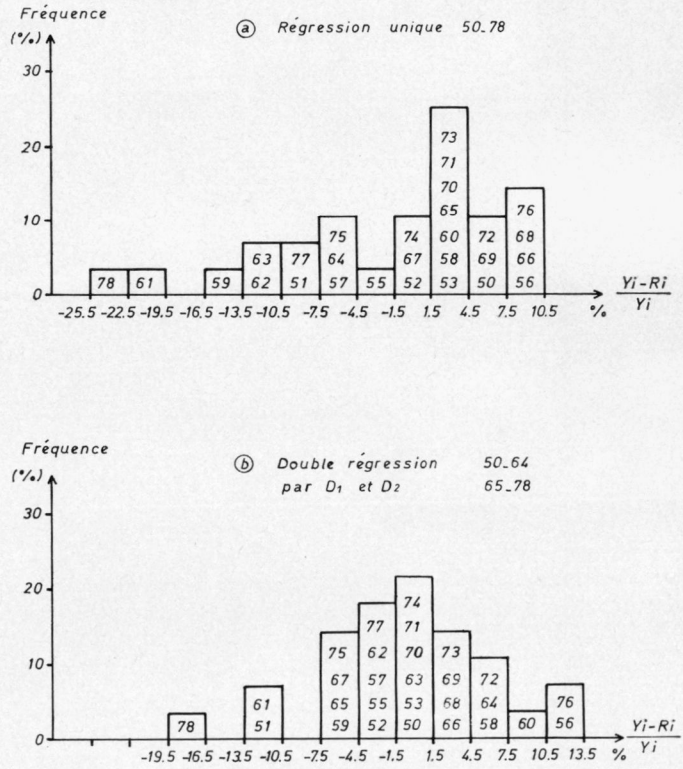


FIG. 4. — *Comparaison des distributions des écarts* $\frac{Y_i - R_i}{Y_i}$ *entre rendement observé et rendement théorique exprimés en p. 100 du rendement observé.*

Compared distributions of the differences $\frac{Y_i - R_i}{Y_i}$ *between actual and theoretical yield, expressed as a p. 100 Yi of actual yield.*

2.12. *Des composantes du rendement.*

— *Le nombre d'épis par m²* (fig. 5*a*) n'est pas significativement ($P < 0,95$) corrélé avec le temps ($R = 0,36$). Cependant le graphique fait apparaître une discrimination possible de la période 58-78 en deux populations : l'une, composée des années 58-60-62-65-67-68-70-72-73-76-77, correspond à un nombre moyen d'épis de 490 ; l'autre, composée des années 59-61-63-64-66-69-71-74-75-78, correspond à un nombre moyen d'épis de 432.

— *Le poids de mille grains* (fig. 5*b*) ne semble pas affecté par une tendance quelconque.

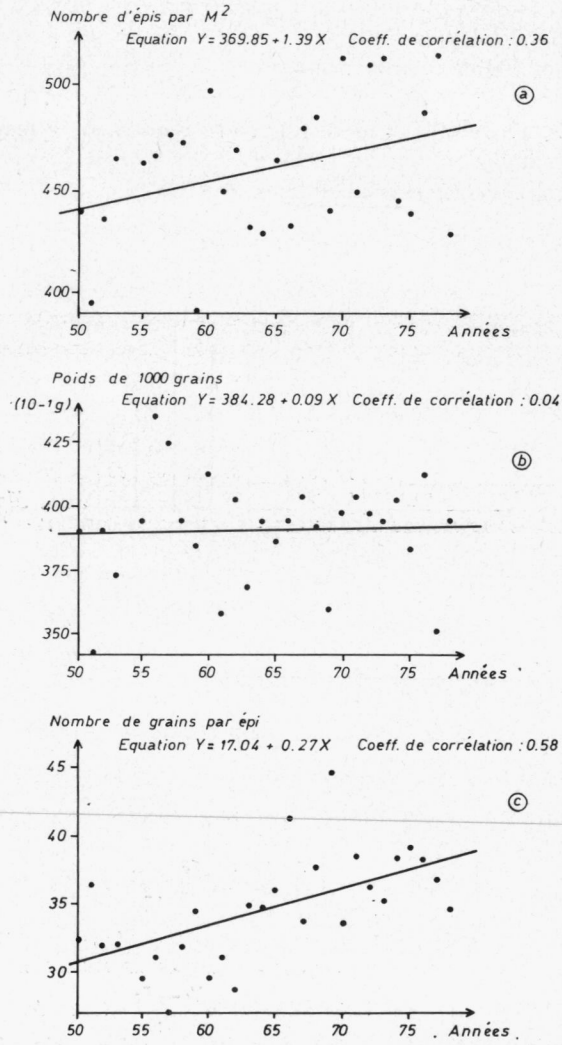


FIG. 5. — *Ajustement linéaire de l'évolution des composantes du rendement au cours du temps pour la période* 1950-1978

Linear adjustments of yield components evolution with time for the 1950-1978 *period.*

— *Le nombre de grains par épi* (fig. 5c) est la seule composante dont la corrélation avec le temps soit significative ($P > 0,95$). Mais on retrouve la coupure autour des années 64-65 : dans la première période, le nombre moyen de grains est de 31,9 dans la deuxième il est de 37,4.

Ainsi l'évolution des techniques culturales a eu pour effet de faire croître sensiblement le nombre de grains par épi, d'influencer sans doute aussi le nombre d'épis par m², mais a eu très peu d'effet sur le poids de mille grains.

Ce type d'analyse partielle ne tient pas compte des interactions entre les composantes du rendement. Pour étudier simultanément leurs différents comportements et mettre en évidence les facteurs qui les provoquent, nous allons faire appel à une technique d'analyse des données.

2.2. — *Analyse factorielle*

2.21. *Principe de la méthode.*

L'analyse factorielle représente un ensemble de méthodes de réduction et de description des grands tableaux de données (Lebart *et al.*, 1977). Elle est très fréquemment utilisée dans des études analogues à celles que nous nous proposons de faire (Strizyks et Pous, 1975 ; Malet et Delecolle, 1976).

On va procéder à une analyse en composantes principales avec comme variables, les composantes du rendement et comme individus, les années de la série. Notre objectif sera d'analyser les différences entre les années c'est-à-dire d'interpréter les projections des années sur les plans factoriels.

Comme cette analyse va servir de support à l'élaboration d'un modèle de prévision, nous réserverons les années 1976-77-78 comme tests pour la prévision : elles n'entrent donc pas dans l'analyse.

2.22. *Résultats.*

Les deux premiers axes factoriels représentent respectivement 59 et 25 p. 100, soit à eux deux 84 p. 100 de la variabilité totale ; le plan factoriel qu'ils déterminent est donc une bonne représentation des données de base.

TABLEAU 1

Matrice de corrélation des quatre variables : nombre d'épis par m², poids de mille grains, nombre de grains par épi et rendement

Correlation matrix of the four variables : number of ears/m², weight of one thousand grains, number of grains/ear, yield

	Nbre épis	P. 1 000	Nbre grains	Rend.
Nbre épis.....	1			
P. 1 000.....	0,32	1		
Nbre grains	— 0,18	— 0,35	1	
Rend.	0,54	0,27	0,65	1

Le premier axe est corrélé positivement avec le poids de mille grains et le nombre d'épis par m², et négativement avec le nombre de grains par épi (fig. 6*a*). Ce résultat est cohérent avec le fait qu'il y a une corrélation positive (0,32) entre nombre d'épis/m² et P 1 000, une corrélation négative (— 0,35) entre le P 1 000 et le nombre de grains par épi et non significative (— 0,18) entre le nombre d'épis/m² et le nombre de grains par épi (Cf. tabl. 1).

L'examen de la projection des individus sur le plan factoriel éclaire ces différentes relations (fig. 6*b*).

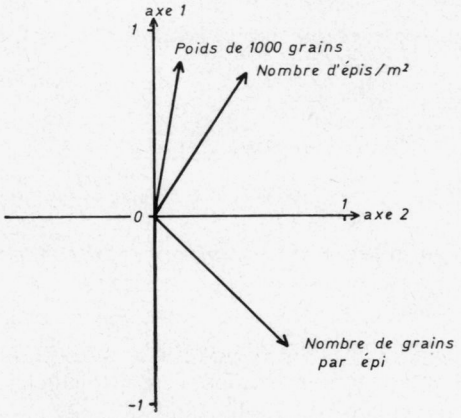


FIG. 6*a*.

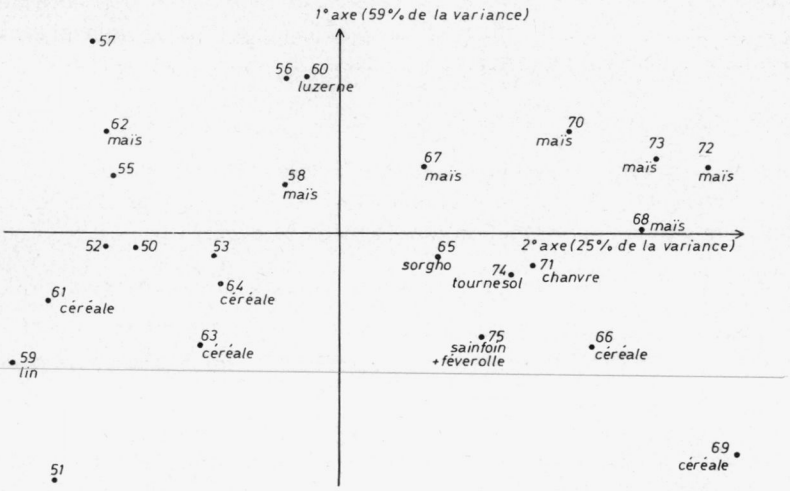


FIG. 6*b*.

FIG. 6. — *Analyse en composantes principales sur les composantes du rendement pour la période* 1950-1975. *a*) Direction et corrélations des variables dans le plan factoriel (1, 2). *b*) Projection des années dans le plan factoriel (1, 2). On a porté pour chaque année la nature du précédent cultural.

Principal components analysis of yield components for the period 1950-1975. *a*) Direction and correlations of variables in the (1-2) factorial plan. *b*) Projection of years on the (1-2) factorial plan for each year, the preceding crop is noted.

En effet, l'axe 1 sépare les années dont on connaît les précédents culturaux (1958 à 1975) en deux populations déjà observées, à quelques différences près, sur le nombre d'épis par m² (fig. 5*a*) :

a) Groupe 1 : 58, 60, 62, 67, 68, 70, 72, 73,

b) Groupe 2 : 59, 61, 63, 64, 66, 69,
Groupe 3 : 65, 71, 74.

Or ces trois groupes se caractérisent effectivement par des précédents culturaux différents : maïs et luzerne à grains pour le premier ; sorgho, tournesol et chanvre pour le second ; céréales, sainfoin, féverole et lin pour le troisième.

L'axe 1 est donc un axe « précédent cultural » : pour de fortes valeurs de l'axe 1, c'est-à-dire pour les précédents culturaux du groupe 1, on a un nombre d'épis et un poids des grains élevés et un nombre de grains par épi faible. Réciproquement, bien sûr, aux faibles valeurs de l'axe 1, c'est-à-dire pour les précédents culturaux des groupes 2 et 3, correspondent un nombre d'épis et un poids des grains faibles et un nombre de grains par épi plus élevé.

On peut essayer d'expliquer cet effet « précédent cultural » en examinant les caractéristiques agronomiques de chacun des groupes de précédents :

— le maïs et la luzerne sont des cultures irriguées ; elles sont en outre récoltées suffisamment tôt en région méditérranéenne pour permettre une bonne préparation du sol pour les semis de blé ;

— le sorgho est irrigué à des doses comparables, le chanvre et le tournesol à des doses moindres ; mais ces cultures ont en commun de libérer les terres plus tardivement si bien qu'elles ne permettent pas une aussi bonne préparation des sols que le maïs et la luzerne. En outre le sorgho est une culture plus « épuisante » en azote pour le sol et dans cet essai, cet effet dépressif n'a pas été compensé par un apport d'azote supplémentaire. Sorgho, chanvre et Tournesol constituent donc un groupe de précédents moins favorables au blé que le premier ;

— les céréales, le sainfoin, féverole, le lin sont des cultures sèches ; en outre, elles laissent des terres plus « sales » en plantes adventices et parasites que les autres cultures. Elles constituent donc un groupe de précédents encore moins favorables.

Ainsi l'effet « précédent cultural » est la manifestation des conditions de sol (réserves hydriques, qualité du travail du sol, « propreté »...) qui sont réservées aux semis de blé.

Signalons que les deux composantes les plus corrélées au rendement sont le nombre d'épis par m² ($R = 0{,}54$) et le nombre de grains par épi ($R = 0{,}65$) (Cf. tabl. 1). Or le précédent cultural a un effet positif sur la première, négatif sur la deuxième. En bilan ces effets doivent en partie s'annuler de sorte que l'influence du précédent sur le rendement est probablement atténuée.

L'axe 2, lui, sépare d'un côté les années antérieures à 1965, de l'autre les années postérieures. Cette coupure, déjà observée sur le nombre de grains par épi (fig. 5*c*), correspond à un changement important de la fumure azotée survenu en 1965 : d'une part la dose apportée est passée de 100 à 150 unités, d'autre part le mode d'apport jusqu'alors unique est devenu fractionné (50 unités sont apportées à la montaison).

L'axe 2 est donc un axe « fumure ». Celle-ci a un effet positif sur le nombre de grains par épi et, dans une moindre mesure, sur le nombre d'épis par m². Comme

ces deux composantes sont les plus corrélées avec le rendement, on peut prévoir que le changement de fumure aura un poids important sur les rendements.

On remarquera que le changement de fumure survenu en 1958 (passage de 80 à 100 unités/ha) n'a pas eu de conséquences aussi nettes que celui de 1965, à la fois parce que les essais ont changé d'implantation (la « fertilité » du nouveau lieu d'expérimentation était sans doute plus faible) et que le mode d'apport est resté unique.

Ainsi, l'analyse factorielle fournit une explication claire de l'évolution des rendements, en mettant bien en évidence l'action des conditions culturales sur leur élaboration. Un modèle explicite de l'action de ces facteurs (essentiellement précédent cultural et fumure) apparaît donc tout à fait possible.

3. — Modèle d'action de la fumure et du précédent cultural sur le blé ou modèle « technologique »

3.1. — *Principe et résultats*

A partir des résultats de l'analyse factorielle, nous avons créé deux variables discrètes X_1 « Précédent cultural » et X_2 « Fumure » qui représentent chacune un axe factoriel : à la variable X_1 nous avons donné la valeur $+ 1$ pour les précédents culturaux du groupe 1, 0 pour ceux du groupe 2 et $- 1$ pour ceux du groupe 3 ; à la variable X_2, nous avons donné la valeur 0 pour les fumures faibles (années 1950 à 1964) et $+ 1$ pour les fumures plus fortes et d'apport fractionné (années 1965 à 1975). Pour les années 1950 à 1957 dont on ne connaît pas le précédent cultural, les valeurs prises par la variable X_1 ont été fixées par la position des années dans le plan factoriel : $- 1$ pour 1951, 0 pour 1950-52-53, $+ 1$ pour 1955-56-57.

Pour les années 1976-77-78 sur lesquelles on veut faire une prévision, les valeurs prises par les variables X_1 et X_2 seront déterminées non par leur projection sur les axes factoriels — que l'on ne peut obtenir qu'en connaissant déjà les composantes du rendement — mais par la nature du précédent cultural et les doses d'azote appliquées :

$X_2 = 1$, $X_1 = 1$ pour 1976 (maïs, précédent du groupe 2),

$X_2 = 1$, $X_1 = 0$ pour 1977-78 (soja, tournesol, précédents du groupe 2).

En appliquant la procédure de la régression multiple sur les 25 années (1950-1975) ainsi codées, on obtient l'équation :

$$R_i = 55{,}19 + 1{,}63\ X_{1i} + 13{,}37\ X_{2i}$$

avec un coefficient de corrélation multiple (R) de 0,91 et de détermination (R^2) de 0,83. Le test de Student indique que l'introduction de la fumure (X_2) est plus significative ($P > 0{,}99$) que celle du précédent cultural ($P > 0{,}95$). D'après les coefficients de régression, la fumure a bien, comme prévu, un poids prédominant. D'ailleurs à elle seule elle explique 79 p. 100 de la variance.

3.2. — *Performances*

3.21. *Méthodologie.*

Il s'agit de mesurer les performances de ce modèle par comparaison avec la tendance temporelle à la fois pour la description de l'évolution des rendements et

pour leur prévision agrométéorologique. Dans la première perspective, modèle technologique et tendance temporelle seront utilisés seuls. Dans la deuxième, ils serviront de préalable à l'élaboration d'un modèle climatique, dans la mesure où ce sont leurs résidus (part de la variabilité non expliquée par la technologie ou la tendance) qui seront à expliquer par les facteurs climatiques.

Nous utiliserons deux types de critères d'appréciation des modèles :

a) *Des critères descriptifs* : ce sont des critères qui permettent d'apprécier la façon dont, globalement, le modèle rend compte du phénomène contenu dans les données :

1) le coefficient de corrélation multiple (R) ;

2) le pourcentage de la variance initiale expliquée (V. E.). Ce critère n'ajoute rien au précédent lorsqu'il n'y a qu'un seul modèle de régression linéaire à juger puisqu'il est alors strictement égal à 100 R^2. Par contre, c'est un critère intéressant et commode pour comparer entre eux des modèles dont la procédure d'élaboration n'établit pas directement le coefficient R et qui ont le même nombre de degrés de liberté (DDL) : ce sera le cas pour la comparaison des modèles technologie + climat et tendance + climat ;

3) l'écart type (s) des erreurs d'estimation. Ce critère, lui aussi, n'ajoute rien aux deux précédents lorsqu'il n'y a qu'un seul modèle de régression linéaire à juger. En effet, si ce dernier a été établi sur n répétitions en utilisant k variables et si S était la variance initiale, on a la relation :

$$s^2 = S^2 (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - k - 1} ;$$

4) la moyenne des valeurs absolues des erreurs d'estimation (rendement observé — rendement estimé). Sur des modèles sans biais, tels que ceux que nous aurons à juger, la moyenne des valeurs algébriques des erreurs d'estimation est nulle par définition, et donc sans intérêt ;

5) enfin, parmi les diverses techniques d'analyse des résidus conseillées par Brenot *et al.* (1975), nous utiliserons la plus simple et immédiate : la recherche des tendances les plus compromettantes pour la fiabilité d'un modèle ; par exemple des résidus presque systématiquement négatifs pour les faibles rendements et positifs pour les forts.

b) *Des critères prédictifs* : il s'agit de l'analyse des erreurs de prévision (écart entre rendement observé et rendement prévu) faite sur les années (1976-77-78) qui n'ont pas servi à l'élaboration des modèles. Le choix de ces années se justifie du fait qu'un modèle s'applique toujours aux années qui suivent celles qui ont servi de référence. Mais il se révèle gênant dans la mesure où ces trois années sont exceptionnelles, chacune à leur façon. 1976 est une très bonne année à Montpellier ; les 2 années suivantes se caractérisent par des accidents pathologiques importants : en 1977, apparition d'une nouvelle race de rouille jaune, accompagnée de rouille brune et noire et de septoriose ; en 1978, très forte attaque de Chlorops au tallage, suivie de rouille jaune, septoriose et fusariose. Néanmoins, nous analyserons les résultats suivants :

a) la moyenne $| Y_i - \hat{Y}_i |$ et l'écart-type s* des valeurs absolues (rendement observé — rendement estimé), ainsi que le préconisent Nelson et Dale (1978*a*) ;

b) l'erreur maximale de prévision Max $(Y_i - \hat{Y}_i)$ comparée à celle commise sur les années de référence, comme le préconise In (1977).

3.2.2. *Modèle technologique et tendance temporelle seuls.*

Le tableau 2 et la figure 7 résument la comparaison entre les deux modèles suivant les divers critères que nous avons énumérés. Notons que le nombre de degrés de

TABLEAU 2

Comparaison du modèle technologique et de la tendance temporelle
a) *Critères descriptifs sur les années* 1950-1975

Comparison between technological and trend model
a) *Descriptive criterions* (years 1950-1975) : degrees of freedom (DDL), correlation coefficient (R), proportion (p. 100) of yield variation explained (VE = 100 R^2), mean of absolute values of errors of estimate (difference between observed (Y_i) and estimated ($\hat{Y}_i$) yield), standard error s

	Modèle technologique		Tendance temporelle	
D. D. L.	22		23	
R	0,91		0,81 (1)	
V. E.	83 p. 100		65 p. 100	
	q/ha	p. 100 de Y_i	q/ha	p. 100 de Y_i.
$\overline{\lvert Y_i - \hat{Y}_i \rvert}$	2,6	4,3	3,7	6,1
s	3,1	5,1	4,6	7,5
Maxi $(Y_i - \hat{Y}_i)$	6,1	9,7	— 10,0	— 20,0
	(1956)		(1961)	

(1) Cette valeur diffère de celle calculée sur la série 1950-1978 (R = 0,74, § 2.1.1).

b) *Critères prédictifs sur les années test*

b) *Predictive criterions* (years 1976-77-78) : differences (errors) between observed (Y_i) and predicted ($\hat{Y}_i$) yields, mean of errors' absolute values $\overline{\lvert Y_i - \hat{Y}_i \rvert}$ and algebraic values $\overline{Y_i - \hat{Y}_i}$, standard deviation s * of errors' absolute values

	Modèle technologique		Tendance temporelle	
	$Y_i - \hat{Y}_i$ en q/ha	$\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}$ en p. 100	$Y_i - \hat{Y}_i$ en q/ha	$\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}$ en p. 100
1976	6,4	9,1	4,6	6,0
1977	— 2,1	— 3,1	— 6,3	— 9,5
1978	— 10,3	— 17,6	— 15,3	— 26,2
$\overline{Y_i - \hat{Y}_i}$	— 2,0	— 3,0	— 5,7	— 8,4
$\overline{\lvert Y_i - \hat{Y}_i \rvert}$	6,3	9,3	8,7	13,0
s*	4,1	6,1	5,8	8,6
maxi $(Y_i - R_i)$	— 10,3	— 17,6	— 15,3	— 26,2
	(1978)		(1978)	

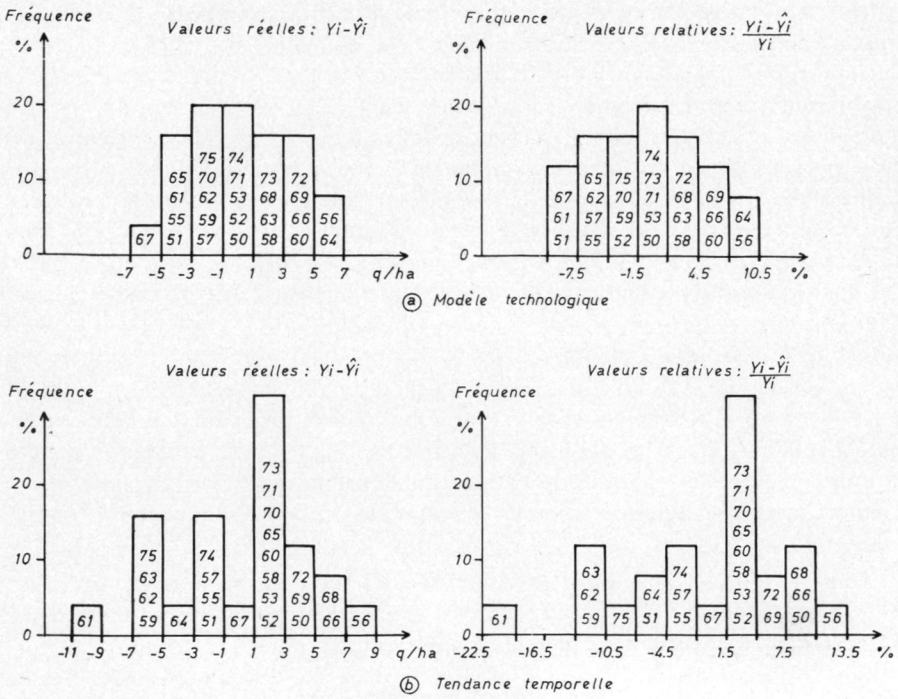


FIG. 7. — *Comparaison des distributions des erreurs d'estimation du modèle technologique et de la tendance temporelle pour la période* 1950-1975.

Compared distributions of the errors of estimate of both technological and trend model, for the 1950-1975 *period.*

liberté n'est pas strictement identique pour les deux modèles (n — 3, soit 22 pour le modèle technologique, n — 2 soit 23 pour la description temporelle).

D'un point de vue descriptif (tabl. 2*a*), la tendance temporelle est nettement moins bonne que le modèle technologique, elle explique même moins de variance initiale (V. E. = 65 p. 100) que le modèle technologique qui ne prend en compte que l'effet fumure (V.E. = 79 p. 100).

Toutefois, les résidus des deux modèles (fig. 7) ont une tendance à peu près équivalente à être négatifs pour les années à faibles rendements (1950 à 1964 à l'exception de 1956 et 1960 : Cf. fig. 2) et positifs pour les années à forts rendements (1965 à 1975 et 1956, 1960). C'est évidemment la conséquence de l'interaction des techniques culturales avec le climat qui n'est pas encore pris en compte.

D'ailleurs, si les performances prédictives du modèle technologique sur les années test sont les meilleures (tabl. 2*b*), elles sont loin de ce que laissaient espérer les critères descriptifs.

3.2.3. *Modèles agrométéorologiques.*

Nous avons adopté le modèle climatique linéaire, très fréquemment utilisé (Hanus, 1969 ; Thompson, 1969 ; Williams, 1969 ; Gerbier, 1976), qui s'élabore à

l'aide d'une procédure de régression multiple pas à pas (Stepwise, en anglais). Le programme utilisé (REPRG du département de Biométrie de l'INRA) procède par sélection ascendante des variables (Forward Procedure) : à chaque étape est choisie la variable qui prend en compte la plus grande part de la variance restant à expliquer (la première variable introduite est donc celle qui a le plus grand coefficient de corrélation simple avec la variable à expliquer). Outre le test de Student qui mesure à chaque étape l'intérêt d'introduire la nouvelle variable et de maintenir les précédentes, le programme REPRG calcule aussi le facteur d'inflation de la variance (VIF) proposé par Marquardt et Snee (1975). Ce facteur mesure pour chaque variable X_i les relations linéaires qui la lient aux autres variables introduites (1) : il croît au-delà de l'unité au fur et à mesure que ces relations augmentent. C'est donc un critère très intéressant pour la robustesse des modèles.

Les résidus $r_i = Y_i - \hat{Y}_i$ du modèle technologique, et ceux $r'_i = Y_i - \hat{Y}'_i$ de la tendance temporelle ont été présentés tour à tour à cette procédure, en tant que variables à expliquer. Dans les deux cas, les variables explicatives proposées ont été les moyennes mensuelles (puisque le rythme du développement du blé l'autorise) des facteurs climatiques qui étaient le plus susceptibles *a priori* d'influencer le rendement du blé :

Pour les mois de novembre et décembre : les sommes des températures diurnes (STD) et nocturnes (STN), les indices actinothermiques minimums à 10 cm (IA10) et à 50 cm (IA50), tout ceci en °C, et la pluviométrie (P) en mm.

Pour les mois de janvier à juin et pour la première décade de juillet : toujours STD, STN, IA10, IA50 (en °C) plus le rayonnement global (RG) en MJ/m^2, et la différence entre la pluie et l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Penman (P — ETP) en mm.

Ces données climatiques sont celles recueillies par la station INRA de Montpellier Bel Air de 1951 à 1974 puis à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique à partir de 1975. Les données antérieures n'étant pas disponibles en fichier informatique, les rendements de 1950 et 1951 ont dû être exclus de l'analyse. Celle-ci porte donc sur 23 ans (1952-1975, avec 1954 manquant).

Le tableau 3 indique les variables introduites et leur coefficient de régression.

Pour les résidus du modèle technologique : jusqu'à la septième étape, car jusque là l'introduction de chaque variable est significative ($P > 0{,}95$) et le VIF maximum reste acceptable (1,5).

Pour les résidus de la tendance temporelle : jusqu'à la troisième étape seulement, car au-delà l'introduction d'une nouvelle variable n'est plus significative et le VIF maximum croît (> 3).

Notons que, sur les résidus du modèle technologique, le coefficient de détermination (100 R^2) est déjà 67 p. 100 à la troisième étape au lieu des 51 p. 100 sur les résidus de la tendance temporelle.

Pour évaluer la variance expliquée totale de chaque succession (technologie + climat = modèle 1, tendance + climat = modèle 2), on fait la somme de la fraction de la variance expliquée (VE_1) par le modèle non climatique (technologique ou ten-

---

(1) VIF $(X_i) = 1/(1 - R_i)$. R_i = coefficient de corrélation multiple de X_i avec toutes les variables X_j $(j \neq i)$ introduites. VIF varie donc de 1 ($R_i = 0$) à l'infini ($R_i = 1$).

TABLEAU 3

Modèles climatiques
Climatic models

Variables introduites		Coefficients de la régression sur les résidus	
Mois	Paramètres	du modèle technologique	de la tendance temporelle
Novembre	IA10	0,894 ** (4)	
Décembre	P	0,024 ** (3)	
Janvier	STD	—	0,162 ** (1)
Février	P — ETP	0,011 * (6)	
Avril	STD	— 0,051 * (7)	
Mai	STN	0,158 ** (2)	
Juin	P — ETP	0,019 ** (5)	
Juillet	P — ETP	0,132 ** (1)	0,096 ° (3)
	IA10	—	1,29 * (2)
Terme constant		— 10,6	— 26,4
Coefficient de détermination ($100 \times R^2$)....		89 p. 100	51 p. 100
VIF maximum		1,5	1,1

N.B. — Les chiffres entre parenthèses après les valeurs des coefficients de régression indiquent l'ordre d'entrée des variables. Les astérisques indiquent le résultat du test de Student sur les coefficients de régression : ** significatif à P = 0,01 ; * significatif à P = 0,05 ; ° significatif à P = 0,10. (Numbers between parentheses behind the values of regression coefficients indicate the order of introduction of variables. Asterisks indicate the results of Student test upon regression coefficients : ** significant at P = 0,01 level ; * significant at P = 0,05 level ; ° significant at P = 0,10 level).

dance temporelle) et de la fraction de la variance expliquée par le modèle climatique (VE_2) appliquée à ce qu'il reste à expliquer ($1 - VE_1$) (tabl. 4*a*) :

$$\text{V.E. totale} = VE_1 + VE_2 (1 - VE_1) .$$

Pour obtenir un pourcentage, il suffit de multiplier ce résultat par 100.

La succession technologie + climat est pratiquement assurée dès le départ de meilleures performances descriptives, puisqu'elle contient de toute façon cinq variables de plus (quatre climatiques et une technologique), et les résultats figurant dans le tableau 4*a* étaient prévisibles. Aussi, les résultats importants de cette étude sont à extraire de l'analyse des résidus et des performances prédictives sur les années test.

Aucune tendance grave n'apparaît avec évidence sur la distribution des résidus (fig. 8). Bien sûr ceux du modèle 2 sont nettement dispersés ainsi que le laisse prévoir l'écart-type s du tableau 4*a*.

Encore une fois, les performances prédictives (tabl. 4*b*) sont très éloignées de ce qu'on pouvait espérer. Mais elles sont tout de même nettement meilleures pour le modèle 1. On note au passage que l'écart-type des valeurs absolues des erreurs (s*),

critère proposé par Nelson et Dale (1978*b*), est très trompeur : si toutes les valeurs absolues des erreurs sont presque identiques (comme ici pour le modèle 2), quel que soit leur niveau moyen, l'écart-type s* est obligatoirement petit.

TABLEAU 4

Comparaison des modèles 1 (*technologie* + *climat*) *et* 2 (*tendance* + *climat*)

a) *Critères descriptifs sur les années* 1952-1975

Comparison between combination 1 (*technological* + *climatic models*) *and combination* 2 (*trend* + *climatic models*)

a) *Descriptive criterions* (years 1952-1975) : proportion (p. 100) of yield variation explained ($VE = VE_1 + VE_2 (1 - VE_1)$) ($VE_1$ = yield variation explained by technological or trend model, VE_2 = yield variation explained by climatic model), mean of errors of estimate's absolute values, standard error s

	Modèle 1		Modèle 2	
V. E. totale	98 p. 100		83 p. 100	
	q/ha	p. 100 de Y_i	q/ha	p. 100 de Y_i
$\overline{\lvert Y_i - \hat{Y}_i \rvert}$	0,86	1,4	2,4	3,9
s	1,0	1,7	3,2	5,2
Maxi $(Y_i - \hat{Y}_i)$	— 2,2	— 3,3	6,9	11,6
	(1965)		(1958)	

b) *Critères prédictifs sur les années test*

b) *Predictive criterions* (years 1976-77-78) : errors of prediction, mean of errors' absolute and algebraic values, standard deviation s * of errors' absolute values

	Modèle 1		Modèle 2	
	$Y_i - \hat{Y}_i$ en q/ha	$\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}$ en p. 100	$Y_i - \hat{Y}_i$ en q/ha	$\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}$ en p. 100
1976	— 7,2	— 9,4	— 16,3	— 21,3
1977	— 8,3	— 12,4	— 14,2	— 21,3
1978	— 13,7	— 23,5	— 15,8	— 27,1
$\overline{Y_i - \hat{Y}_i}$	— 9,7	— 14,5	— 15,4	— 23,0
$\overline{\lvert Y_i - \hat{Y}_i \rvert}$	9,7	14,5	15,4	23,0
s *	3,5	5,2	1,1	1,6
Maxi $(Y_i - \hat{Y}_i$	— 13,7	— 23,5	— 16,3	— 27,1
	(1978)		(1976)	(1978)

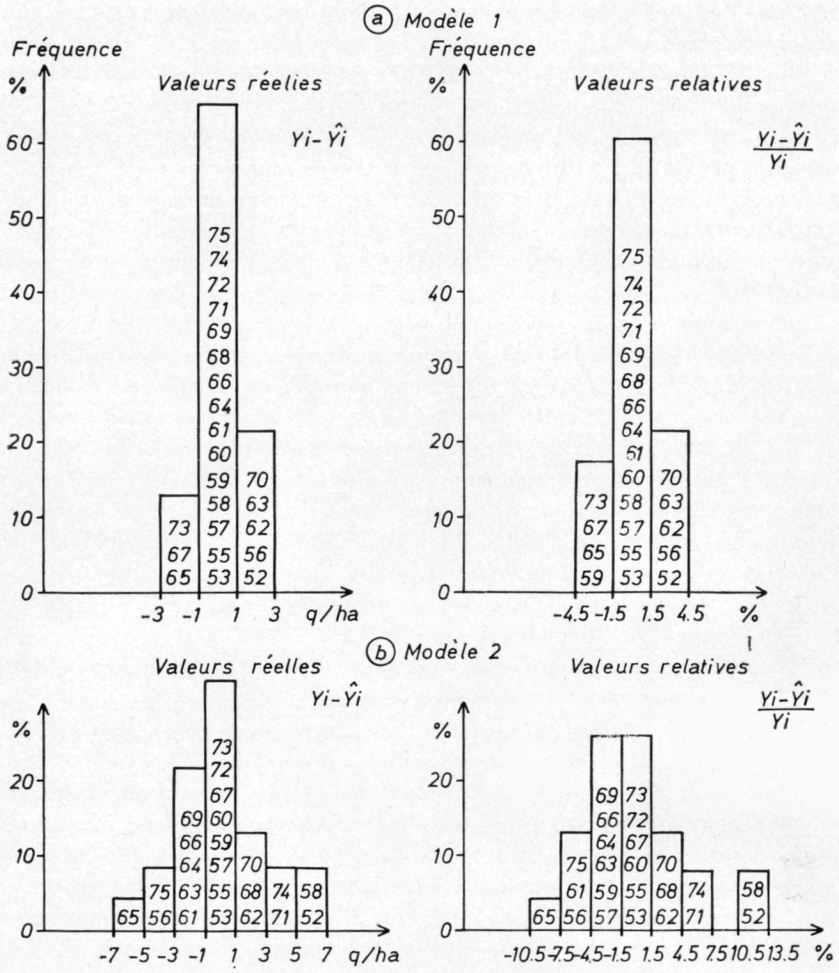


FIG. 8. — *Comparaison des distributions des erreurs d'estimation des modèles* 1 *et* 2 *pour la période* 1952-1975.

Compared distribution of the errors of estimate of model 1 *and* 2, *for the* 1952-1975 *period.*

4. — Discussion

Cette étude montre l'intérêt incontestable qu'il y a à expliciter l'évolution des rendements au cours du temps : (i) par l'augmentation de la fumure azotée, ainsi que Nelson et Dale (1978*b*) le démontrent aussi pour le maïs, et (ii) par les changements du précédent cultural qui, en effet, module significativement l'influence de la fumure.

Les précédents culturaux (ou, ce qui est équivalent, les assolements), sont donc des données aussi précieuses que les doses d'engrais pour établir des modèles agro-météorologiques robustes dans les régions de polyculture. On voit à quel point il est souhaitable de disposer, pour la plupart des régions de France et même d'Europe,

de banques de données complètes tant pour les facteurs agrotechniques que pour les variables climatiques.

De plus, la méthodologie employée (une analyse factorielle) pour expliciter l'influence relative des facteurs agrotechniques a illustré l'intérêt qu'il y aurait à disposer aussi de mesures des composantes du rendement. Malheureusement, ces données n'existent pas dans des statistiques agricoles régionales ou nationales.

La procédure employée pour construire les modèles agrométéorologiques a consisté à élaborer un modèle climatique sur les résidus d'un modèle technologique (ou de description temporelle). Elle est également adoptée par certains auteurs (Hanus, 1969 ; Brochet *et al.*, 1977).

Son intérêt démonstratif évident explique que nous l'ayons choisie dans cette étude. Mais elle est très critiquable d'un point de vue statistique : d'une part, les résidus sur lesquels porte la régression avec les variables climatiques sont des valeurs estimées et donc entachées d'erreurs ; d'autre part, lorsque ces résidus manifestent une certaine tendance à être négatifs pour les faibles rendements et positifs pour les forts, ils ne sont sans doute pas absolument indépendants les uns des autres. Dans un cas comme dans l'autre, on sort des conditions d'application de la procédure de la régression multiple pas à pas. Afin d'éviter cet écueil, il convient de présenter ensemble facteurs agrotechniques et variables climatiques. C'est la voie choisie par Nelson et Dale (1978*b*). Cette procédure permet, en outre, d'introduire, si nécessaire, les interactions entre la technologie et le climat.

Mais, de toute façon, les performances d'un modèle agrométéorologique par régression multiple sont incontestablement tributaires :

(i) *Du choix des variables présentées.* Cet article illustre ce point en ce qui concerne les facteurs agrotechniques. Mais il en est évidemment de même pour les variables climatiques. Par exemple, le modèle technologie + climat aurait sans doute des performances différentes si des variables climatiques moins nombreuses ou de nature différente, avaient été présentées. Notons à ce sujet qu'en choisissant, pour la première fois à notre connaissance, les sommes des températures diurnes (STD) et nocturnes (STN) au lieu des températures moyennes, on diminue le VIF maximum (1,5 à la septième étape au lieu de 2,0), c'est-à-dire les corrélations entre les variables explicatives.

(ii) *Du choix de la procédure statistique.* Même pour une régression multiple pas à pas, il existe plusieurs procédures d'élaboration possibles : par exemple la sélection descendante des variables (Backward procedure) au lieu de l'ascendante (Fotward) à laquelle on a fait appel ici ; ou encore d'autres critères d'estimation des coefficients de régression que celui des moindres carrés. D'ailleurs dans des modèles de prévision il serait sans doute préférable d'utiliser des méthodes, telles que la « Ridge regression » (Marquardt et Snee, 1975) qui aboutissent à des coefficients de régressions biaisés mais beaucoup moins variables. Or les diverses procédures ne sélectionnent pas les mêmes séries de variables (Hocking, 1976).

Dans ces conditions, il est relativement vain d'essayer d'interpréter ne serait-ce que la présence ou l'absence de telle ou telle variable climatique dans un modèle agrométéorologique.

Cette conclusion est parfaitement illustrée par le nombre et la nature des variables climatiques présentées dans le modèle 2 (tendance temporelle + climat). En raison de la façon dont est décrite l'action des facteurs agrotechniques, de la procédure

d'élaboration scindée en deux étapes, du critère de sélection des variables et de calcul des coefficients de régression, on aboutit à trois variables seulement, dont deux ne concernent que les 10 derniers jours du cycle de végétation du blé (sur un total de deux cent quarante en moyenne à Montpellier) !

A cette réserve, s'ajoute enfin la différence systématique et importante trouvée entre les performances descriptives des modèles (c'est-à-dire sur les années servant à leur élaboration) et leurs performances prédictives (sur les années test). Certes, un modèle est valable exclusivement pour les intervalles de variation des facteurs agissants (explicités dans le modèle ou implicites) qui prévalent pour les années sur lesquelles il a été établi.

Or, on a vu que les trois années test dont nous disposions en fin de série, étaient exceptionnelles chacune à leur façon.

Cependant pour 1976, on trouve bien dans la série de référence, une année (1972) comparable : même précédent cultural (maïs irrigué), même fumure azotée (150 kg/ha), et rendement du même ordre de grandeur (73,5 q/ha au lieu de 76,6 q/ha). Or l'erreur de prévision de 1976 par le modèle (technologie + climat) est dix fois supérieure (7,2 q/ha : cf. tabl. 4*b*) à celle trouvée en 1972 (0,7 q/ha : cf. fig. 8). Si la seule explication était le changement d'intervalle de variation des facteurs, il faudrait que le rendement de 1976 ait été atteint grâce à une combinaison de facteurs climatiques radicalement différente de celle qui produisit le rendement de 1972, ce qui est peu probable.

En réalité, la forme linéaire du modèle sans terme quadratique est probablement en cause. En effet, la plupart des facteurs ont une loi d'action qui comprend un « palier » plus ou moins large (fig. 9). Si l'intervalle de variation d'un facteur (X) dans la série des années de référence est la zone (A + B), un modèle linéaire sans terme quadratique (X^2) donnera comme réponse moyenne une droite telle que D. Pour toute année où le facteur X sera compris dans la zone B, celle des bons rendements, la prévision fournie par la droite D sera nettement supérieure au rendement réel ($Y_i - \hat{Y}_i < 0$) : cette situation correspond sans doute à celle de 1976.

Par contre, les changements d'intervalle de variation du facteur « parasitisme » peuvent expliquer presque à eux seuls les très mauvaises prévisions sur 1977 et 1978 : ces attaques parasitaires exceptionnelles ont sans doute déplacé à un niveau inférieur

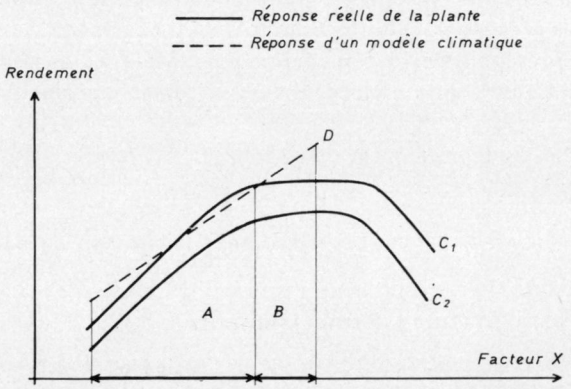


FIG. 9. — *Schéma de la courbe de réponse d'une plante à un facteur climatique X.*
Theoretical aspect of plant response to one given climatic factor X.

(de C_1 à C_2 sur la fig. 9) les réponses de la plupart des facteurs. Aussi, même dans la zone A, à réponse linéaire, les prévisions au moyen d'une droite D sont obligatoirement optimistes ($Y_i - \hat{Y}_i < 0$).

Bien entendu, ce raisonnement est valable aussi pour un facteur agrotechnique : ainsi, un terme quadratique pour la fumure azotée sera superflu dans les régions de culture extensive (qui correspond à la zone A), mais nécessaire dans les zones de céréaliculture intensive (qui ont un intervalle de variation de la fumure chevauchant les zones A et B).

Dans ces conditions, pour obtenir des modèles de prévisions fiables conservant la forme simple et commode de la régression multiple, il est préférable de définir des régions homogènes vis-à-vis des facteurs agrotechniques et d'élaborer ensuite un modèle agrométéorologique pour chaque région. Ce faisant, on réduira aussi les intervalles de variation des facteurs climatiques, si bien que tout concourra à une meilleure fiabilité des modèles.

Cependant, il reste nécessaire d'avoir des séries de données suffisamment longues pour être à peu près sûr de couvrir complètement dans chaque région l'intervalle de variation possible de chaque facteur.

Conclusion

La pratique courante d'un ajustement statistique des rendements en fonction du temps pour décrire l'effet des progrès techniques est une source certaine d'instabilité des modèles agrométéorologiques. Cette étude démontre qu'il est beaucoup plus efficace d'expliciter l'action des facteurs agrotechniques, même au moyen du modèle linéaire le plus classique : il suffit d'y inclure le niveau de fumure azotée et, d'une façon ou d'une autre, le précédent cultural.

Dans cette étude, l'introduction du précédent cultural a été grandement facilitée par certaines qualités des données, qu'on ne peut malheureusement espérer obtenir qu'en stations expérimentales : (i) mesures des composantes du rendement, (ii) indépendance entre les niveaux de fumure et les précédents culturaux.

Nous avons cependant montré que la transposition du résultat à un niveau régional ou national est possible à condition : (i) de détenir bien sûr des données statistiques sur la fumure et les précédents culturaux ou, ce qui est équivalent, sur les assolements ; (ii) de définir au préalable des régions homogènes vis à vis de ces deux principaux facteurs agrotechniques ; (iii) d'élaborer des modèles agrométéorologiques pour chaque région.

En outre, cette étude met en évidence un certain nombre de contraintes et de difficultés statistiques inhérentes à l'objectif « prévisionnel » de tous les modèles agrométéorologiques.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Remerciements

Nous remercions vivement Monsieur P. Grignac, de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier qui nous a confié les résultats de ses essais et fourni toutes explications nécessaires à leur interprétation, Monsieur F. Ariès du Laboratoire de Biométrie d'Avignon pour ses conseils sur le choix des traitements statistiques, et Monsieur J. C. Ferren pour l'exécution des figures.

Summary

A model of the response of wheat to agrotechnical factors

I. — Principle and first results for a cultivar grown in experimental fields

In crop-weather models for yield forecast, technical and cultural factors are usually taken into account by a simple statistical description of yields evolution with time (« trend »). The use of explicit models of the action of those factors is one of the best ways to improve yield forescasting. The principle of such an approach and its first results obtained from experimental plots are here given.

The influence of nitrogen fertilization and forecrop is shown through a principal component analysis of yield components over 25 years observations (fig. 6). Therefore a model involving those factors (« technological » model) is proposed and compared to a « trend » model, in two different ways :

a) Without climatic data (tabl. 2).

b) A climatic model is combined with those models : it is obtained by regression analysis upon their residual errors (tabl. 3). Combination 1 (technological model + climatic model) and combination 2 (trend model + climatic model) are so compared (tabl. 4).

In any case, predictive performances (prediction on « test years » 1976-77-78) are much lower than descriptive ones (estimations upon reference period 1950-1975 or 1952-1975). However predictive performances of technological model (tabl. 2 and fig. 7) are superior to those of trend model. Combination 1 also appears to work better than combination 2 (tabl. 4 and fig. 8).

The necessary conditions to extend this result to a regional scale are discussed : quality of agrotechnical data and form of the models.

Zusammenfassung

Ein Wirkungsbeispiel der Anbautechniken auf Getreide

I. — Prinzip und erste Ergebnisse auf eine im experimentalen Bereich Angepflanzte Landsorte

In den agrometeorologischen Beispielen der Ergiebigkeitsvoraussage werden im allgemeinen die Anbau und technischen Faktore in einer einfachen statistischen Beschreibung des Zeitabhägigen Ergiebigkeitsverlaufs berücksichtigt. Die Entwicklung klarer Beispiele der Wirkung dieser Faktoren ist ein sicheres Mittel der Aussageferbesserung. Das Prinzip sowie die, in einer Versuchsstation erreichten ersten Ergebnisse werden hier angegeben.

Ausgehend von der Analyse der Ergiebigkeitskomponenten während auf 25 Jahre ausgedehnte Beobachtungen, wird ein Beispiel der Stickstoffdüngung und des landwirtschaftlichen Präzendensfalles bei Getreide vorgeschlagen. Ob allein engewandt oder in Verbindung mit einem klimatischen Beipiel, hat dieses sogenannte « technologische » Beispiel, höhere Voraussagungsleistungen als eine einfachen lineare Anpassung der Zeitabhängigen Ergiebigkeiten.

Es werden die nötigen Bedingungen einer Übertragung dieses Ergebnisses auf einen regionalen oder nationalen Masstab erörtert : Werte der agrotechnischen Daten, Forme der Beispiele.

РЕЗЮМЕ

Модель действия приемов культуры на пшенипу.

I принципы и первые результаты опытов с сортом возделывавшемся в опытном хозяйстве.

ОЛИВБЕ МАРТИНА, МАЛЕ П.

Принятие во внимание технических факторов культуры в агрометеорологических моделях прогноза урожайности, является, почти всегда, простым статистическим описанием эволюции урожаев в зависимости от могоды. Развитие определенно выраженных моделей действия этих факторов и есть настоящии верный путь дия улучшения прогноза ; в данной работе

указываются принципы этого развития и приВодятся первые результаты полученные в экспериментальном хозяйстве.

На базе анализа составных урожая в серии 25-ти летних наблюдений, предлагается модель действия азотного удобрения и пред'идущей культуры на пшеницу. При ее применении отдельно, или-же в ассоциации с климатической моделью, эта модель, называемая « технологической », дает лучшие прогнозы, чем простое линейное соотношение урожайности в зависимости от погоды.

Обсуждаются условия необходимые для транспонировки этого результата в районном или национальном масштабе.

Références bibliographiques

BRENOT J., CAZES P., LACOURLY N., 1975. Pratique de la régression : qualité et protection. *Cahiers du bureau universitaire de recherche opérationnelle*. Série Recherche. Cahier n° 23, 100 p.

BROCHET P., GERBIER N., REMOIS P., 1977. *Etude agrométéorologique du blé tendre d'hiver*. Monographie n° 101 de la Météorologie Nationale, 79 p.

GERBIER N., 1976. Contribution à l'étude agrométéorologique de la production du maïs grain en France. *Proc. WMO Symp. on the Agrometeorology of the maize (corn) crop*. AMES, IOWA 5-9 July 1976, 314-349.

HANUS H., 1969. Une méthode de prévision des rendements à la récolte à partir des données climatiques (en allemand). *Z. Acker.- u. Pflanzenbau* **129,** 101-111.

HOCKING R. R., 1976. The analysis and selection of variables in linear regression. *Biometrics* **32** (1), 1-50.

IN K., 1977. Prévision des rendements des plantes cultivées à partir de données météorologiques par régression multiple. *Bull. Rech. Agron. Gembloux* **12** (1-2), 37-54.

LEBART L., MORINEAU A., TABARD N., 1977. *Techniques de la description statistique. Méthodes et logiciels pour l'analyse des grands tableaux*. 351 p. Dunod.

MALET P., DELECOLLE R., 1976. Possibilités d'étude de l'influence d'un aménagement bocager sur la croissance d'un maïs par l'analyse factorielle. *CR Table Ronde CNRS « Ecosystèmes bocagers »*, Rennes, 1976, 299-304.

MARQUARDT D. W., SNEE R. D., 1975. Ridge regression in pratice. *The American Statistician* **29,** 3-20.

NELSON W. L., DALE R. F., 1978*a*. A methodology for testing the accuracy of yield predictions from weather-yield regression models for corn. *Agron. J.* **70,** 734-740.

NELSON W. L., DALE R. F., 1978*b*. Effect of trend or technology variables and record period on prediction of corn yields with weather variables. *J. Appl. Meteor.* **17** (7), 926-933.

PITTER R. L., 1977. The effect of weather and technology on wheat yield in Oregon. *Agric. Meteorol.* **18,** 115-131.

STRIZYCKS S., POUS B., 1975. Etude des facteurs influant sur les rendements en blé tendre. *Cah. Stat. agric.* **22,** 41-57.

THOMPSON L. M., 1969. Weather and technology in the production of corn in the U. S. Corn Belt. *Agron. J.* **61,** 453-456.

THOMPSON L. M., 1977. Weather and Technology in corn production. *Proc. WMO Symp. on the Agrometeorology of the maize (corn) crop*. AMES, IOWA, 5-9 July 1976, 309-313.

WILLIAMS G. D. V., JOYNT M. I., Mc CORMICK P. A., 1976. Regression analyses of Canadian Prairie crop-district cereal yields, 1961-1972, in relation to weather, soil and trend. *Can. J. Soil Sci.* **55,** 43-53.

ANNEXE

Année	Composantes du Rendement		Rendement 10 kg/ha	Précédent cultural	Fumure (unités/ha)		
	Nbre épis/m²	Poids (g) de 1 000 g			N	P	K
50	438	39,0	552	?	80	80	80
51	395	34,2	492	?	80	80	80
52	435	39,0	543	?	80	80	80
53	464	37,3	556	?	80	80	80
55	462	39,4	538	?	80	80	80
56	465	43,5	629	?	80	80	80
57	475	42,4	543	?	80	80	80
58	472	39,4	594	maïs	100	100	100
59	390	38,4	516	lin	100	100	100
60	496	41,2	604	luzerne graines	100	100	100
61	448	35,8	498	céréales	100	100	100
62	468	40,2	539	maïs	100	100	100
63	431	36,8	554	céréales	100	100	100
64	428	39,4	586	céréales	100	100	100
65	463	38,6	643	sorgho	150	120	80
66	432	39,4	702	céréales	150	120	80
67	478	40,3	649	maïs	150	120	80
68	484	39,2	715	maïs	150	120	80
69	439	36,0	704	céréales	150	120	80
70	512	39,7	682	maïs	150	120	80
71	448	40,3	694	chanvre	150	120	80
72	509	39,7	735	maïs	150	120	80
73	512	39,4	712	maïs	150	120	80
74	444	40,2	684	tournesol	150	120	80
75	438	38,3	655	sainfoin-fèverolle	150	120	80
76	486	41,2	766	maïs	150	120	80
77	513	35,2	665	soja	150	120	80
78	428	39,4	583	tournesol	150	120	80

Ann. agron., 1979, **30** (6), 553-575.

Effets de la sécheresse sur la vigne
I. — Etudes sur Cabernet-Sauvignon

Suzanne MÉRIAUX *, H. ROLLIN ** et P. RUTTEN **

* *Institut national de la Recherche agronomique* 149, *rue de Grenelle* 75007, *Paris*

** *Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc*, 685, *Route d'Arles* 30000 *Nîmes*.

Résumé

L'expérience en vases de végétation sur Cabernet-Sauvignon concerne les effets de la sécheresse et le rôle de la surface foliaire. Elle permet de mettre en évidence les périodes de sensibilité de cette variété à la contrainte hydrique, qu'il s'agisse des phénomènes de croissance des organes végétatifs et des baies ou de l'accumulation des sucres. On montre qu'en l'absence de sécheresse, la surface foliaire par unité de rendement influe de façon variable sur la teneur en sucres des baies. Ce résultat débouche sur l'estimation d'une hauteur optimale du feuillage palissé ; l'effet de la sécheresse sur la teneur en sucres se surimpose à cette variation générale.

On tente d'expliquer par la dormance et l'inhibition le rôle d'une alimentation hydrique maximale sur l'accroissement du nombre de bourgeons non débourrés à la base du sarment.

Introduction

La biologie de la Vigne présente la complexité inhérente à toute plante pérenne. Néanmoins, elle est marquée d'une double originalité par rapport à des espèces telles que les arbres fruitiers :

— sa morphologie est celle d'une liane à développement spontané exubérant avec des potentialités d'enracinement profond qui, lorsqu'elles peuvent s'exprimer, lui permettent de s'adapter à la sécheresse. On a observé des racines à 5 m en Médoc (Seguin, 1970), et même jusqu'à 20 m (Viala et Vermorel, 1910) ;

— ses fruits sont en majorité utilisés sous forme de boisson et la transformation nécessaire peut modifier ou corriger les caractéristiques du produit primaire.

L'adaptation botanique de la Vigne à la sécheresse assure sa survie mais, lorsque les conditions climatiques entraînent un déficit hydrique élevé que le sol ne peut satisfaire, la plante est affectée agronomiquement dans sa production quantitative et qualitative, de manière variable avec le cépage et le mode de conduite.

Les relations entre la Vigne et l'eau sont étudiées dans la majorité des pays viticoles. Une synthèse bibliographique établie par Magrisso (1970) pour les raisins de cuve, montre que, si tous les auteurs constatent un accroissement du rendement lié à

l'irrigation, ils ne sont pas unanimes quant à l'amélioration de la qualité par l'apport d'eau. Pour certains, parmi lesquels Nicoloussi (1965), Tseïko (1957), Cerny *et al.* (1967), l'irrigation augmente la teneur en sucres et réduit l'acidité. Pour d'autres, les effets de l'eau sur la qualité sont différents selon les variétés (Pantic et Jazis, 1961), et selon la date d'arrêt des arrosages, la teneur en sucres diminuant lorsque les irrigations sont proches de la récolte (Magrisso et Tontcev, 1967).

En général, avec des arrosages modérés, la teneur en sucres est accrue ou reste inchangée (Azzi, 1954 ; Branas et Vergnes, 1965 ; Vaadia et Kasimatis, 1961). Les résultats les plus contradictoires concernent l'irrigation durant la période de maturation du fruit : pour Luk'janov (1961), Hendrickson et Veihmeyer (1931), l'apport d'eau accroît la teneur en sucres des baies, tandis qu'il l'abaisse selon Galet (1956) et Kattan (1963). L'incohérence des données s'explique par la diversité des conditions écologiques (climat et sol) et par la nature même des expérimentations au champ qui ne permettent pas de maîtriser totalement le facteur hydrique. Très peu d'études ont été conduites en vases de végétation, si ce n'est dans le cadre de recherches sur l'efficience de l'eau (Bravdo *et al.*, 1972), sur la fructification et la photosynthèse (Alleweldt et Höfacker, 1975 ; Magrisso et Slavdeva, 1975).

Face à la complexité du problème, afin de préciser les effets réels de la sécheresse sur la Vigne et son interaction avec la surface foliaire dans le contexte de la région méditerranéenne et pour déboucher sur des techniques raisonnées de culture et d'irrigation, un important programme expérimental a été entrepris par la Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône Languedoc en liaison avec l'I.N.R.A. sur sept variétés (quatre traditionnelles en Languedoc et trois issues des vignobles du Bordelais et des Côtes-du-Rhône), en vases de végétation et en plein-champ. Les expériences sont conduites au Mas d'Asport (Gard).

Le présent mémoire décrit et discute les résultats obtenus en lysimètres sur Cabernet-Sauvignon de 1973 à 1975. Une deuxième publication traitera des autres cépages dans les mêmes conditions contrôlées.

I — Conditions expérimentales et méthodes

1.1. — *Plante et milieu*

1.11. *Matériel végétal.*

Variété Cabernet-Sauvignon franc de pied (sélection clonale de l'Association Nationale Technique pour l'Amélioration de la Viticulture). Plantes âgées de 7 ans lors de leur plantation en vases de végétation (1973).

1.12. *Vases de végétation.*

Cuves en plastique de 200 l équipées en lysimètres (tuyau de drainage, alimentation gravitaire en eau avec distribution selon une couronne au sommet du bac).

Substrat de culture constitué d'un mélange à volume égal de pouzzolane (5-12 cm) et de tourbe légèrement enrichie. Réserve utile en eau d'environ 65 l dont 30 l sont considérés comme « facilement utilisables » d'après des études préliminaires.

Couverture de plastique au sommet du bac pour éviter l'évaporation et la pénétration des pluies.

1.13. *Conduite de la culture.*

Les vases de végétation contenant chacun une plante sont disposés en plein air dans une ambiance irriguée. Chaque vase est au centre d'une surface de 4 m × 1,80 m (équivalence de 1 400 pieds/ha).

Un long bois est conservé et palissé horizontalement. Douze rameaux sont sélectionnés dont onze sont porteurs de grappes (trente à trente-trois grappes par souche). Ces rameaux se développent verticalement. Leur développement n'est pas limité en hauteur dans les expériences concernant la sécheresse. Il est réduit à des hauteurs déterminées dans l'essai relatif à la surface foliaire.

La fertilisation est assurée par des apports de solution nutritive au début de chaque période expérimentale de 21 jours. Après le lessivage hivernal destiné à éviter la salinité, un premier apport est réalisé à l'aide d'une solution de composition C (NPK = 0,231, 0,100, 0,256 g/l + oligoéléments). A l'issue de chaque période, une analyse de l'eau de drainage permet d'ajuster la solution précédente aux besoins nutritifs réels de la plante.

Les traitements phytosanitaires nécessaires à la protection des plantes sont régulièrement effectués (douze traitements par an en moyenne).

1.14. *Conditions climatiques.*

Le climat de 1973 à 1975 est caractérisé par une faible fluctuation interannuelle de l'ensoleillement et de la température durant la période de végétation de la vigne. L'ETP (Penman) mensuelle a présenté les valeurs extrêmes suivantes :

Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
124-149	153-168	167-205	141-169	81-105

1.2. — *Protocoles expérimentaux*

Les deux essais sont disposés en blocs (quatre répétitions).

1.21. *Essai sur l'action de la sécheresse.*

Deux thèmes sont abordés :

— *l'exploration du cycle de la Vigne.* Chaque traitement consiste à appliquer une sécheresse donnée pendant une période de 21 jours selon le protocole mis au point par Robelin (1963) et adapté à la Vigne. Le niveau de sécheresse retenu correspond à une alimentation en eau égale à 0,33 TM, soit 33 p. 100 de la transpiration maximale. Cinq périodes consécutives ont effectivement été prises en compte (périodes II à VI), déterminant les traitements de 9 à 13 (fig. 1). La période I sert à préparer la contrainte de la période II car les vases de végétation ont subi un lessivage en hiver pour éviter la salinité ;

— *la simulation des différentes conditions de sécheresse possibles sous climat méditerranéen.*

En 1973, quatre traitements ont intégré trois niveaux d'alimentation en eau (1, 0,66 et 0,33 TM) selon différentes combinaisons (fig. 1, traitements 14-15-16-17).

Périodes (Period)		I	II	III	IV	V	VI
Dates (Dates)	1973	22/5-11/6	12/6- 2/7	3/7-22/7	23/7-13/8	14/8- 3/8	4/9-24/9
	1974	14/5- 3/6	4/6-24/6	25/6-15/7	16/7- 5/8	6/8-26/8	27/8-16/9
	1975	6/5-26/5	27/5-16/6	17/6- 7/7	8/7-28/7	29/7-28/8	19/8- 8/9
Stades de développement (Development stages)	1973	F	N		V		
	1974		F N			V	
	1975		F	N		V	
1		———	———	———	———	———	———
9		– – – –	– – – –	———	———	———	———
10		———	———	– – – –	———	———	———
11		———	———	———	– – – –	———	———
12		———	———	———	———	– – – –	———
13		———	———	———	———	———	– – – –
1 *bis*		– – – –	– – – –	———	———	———	———
14		———	———	———	———	– – – –	– – – –
15		- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	– – – –	– – – –
16		———	———	———	– – – –	– – – –	– – – –
17		- - - - -	- - - - -	- - - - -	– – – –	– – – –	– – – –
18		———	———	– – – –	. . . .	. . . .	. . . .

FIG. 1. — *Schéma des traitements.*

Treatments diagram.

Signification des symboles (Symbol meaning)

——— 1,00 TM (MT).
- - - - - - 0,66 TM (MT).
— — — 0,33 TM (MT).
. . . . . 0,17 TM (MT).

TM = Transpiration maximale (MT = maximal transpiration).
F = Floraison (Blossoming).
N = Nouaison (Fruit Setting).
V = Véraison (Veraison).

En 1974, la prise en compte d'un quatrième niveau hydrique (0,17 TM) a donné lieu à un traitement supplémentaire (traitement 18).

En 1975, seuls les traitements principaux (15-16-17-18) ont été maintenus tandis qu'un traitement a été ajouté (1 *bis*) simulant la sécheresse de printemps par non-reconstitution hivernale du stock hydrique.

1.22. *Etude sur le rôle de la surface foliaire.*

En 1975 et 1976, quatre traitements ont concerné la hauteur des douze rameaux verticaux de chaque souche : 0,70 m-1,20 m-1,70 m et hauteur illimitée (environ 2,50 m) en condition d'alimentation maximale.

1.3. — *Principales mesures*

1.31. *Dimensions de l'appareil végétatif.*

— Longueur des rameaux et progression de l'aoûtement (hebdomadaire),
— comptage des mérithalles et des feuilles (hebdomadaire),
— surface foliaire (à partir de la longueur L en cm de la nervure principale après recherche de corrélation : $SF\ (cm^2) = 1{,}04\ L^2 + 6{,}17$).

1.32. *Fonctionnement des feuilles.*

— Transpiration par bilan des lysimètres (quotidienne),

— ouverture des stomates ; infiltration et porométrie (au cours du cycle, sur la vingtième feuille à partir de la base du rameau),

— température du feuillage par radiothermométrie à 1,90 m du sol pour le feuillage seul, à 1,55 m du sol pour le feuillage et les grappes (appareil I.N.R.A., Bioclimatologie, Avignon),

— activité photosynthétique : masse sèche surfacique (au cours du cycle).

1.33. *Appareil reproducteur.*

— Comptage d'inflorescences après débourrement,

— datation des principaux stades phénologiques : débourrement, floraison, nouaison, véraison, maturité,

— composantes du rendement par plante : nombre et poids de grains, teneur en sucres.

TABLEAU 1

Vitesses moyennes journalières de croissance et d'aoûtement (cm.j^{-1}), *durée de l'aoûtement* (jours) *et poids des bois* (kg par souche). (Exemple de l'année 1974)

Mean daily speed of growth and ripening of canes (cm.d^{-1}), *ripening of canes duration* (days) *and canes weight* (kg per plant). (Example 1974)

Périodes	Dates	N° du traitement						Signification des différences
		1	9	10	11	12	13	
		Vitesse de croissance (Growth speed)						
II	07/06 à 27/06	2,51	[1,16]	2,64	2,23	2,81	3,18	9 < 10-11-12-13 **
III	27/06 à 18/07	2,60	3,20	[1,41]	2,51	2,75	3,28	10 < 1-9-11-12-13 **
IV	18/07 à 08/08	2,27	4,27	1,85	[0,51]	1,96	3,90	11 < 10 < 9-13 **
V	08/08 à 29/08	1,26	2,20	2,24	0,84	[0,28]	1,19	12 < 9-10 ** 1-13 < 9-10 **
		Vitesse d'aoûtement (Ripening of canes speed)						
V	21/08 à 29/08	0	0	0,46	0,44	[0,15]	0	N. S.
VI	29/08 à 12/09	0,64	0,38	0,23	0,83	0,55	[0,90]	N. S.
	12/09 à 08/10	3,72	4,30	3,22	3,82	1,83	3,39	12 < 1-9-10-11-13 **
	08/10 à 31/10	3,27	3,35	2,95	1,24	4,97	5,60	11 < 1-9-10 < 13 **
	31/10 à 21/11	1,17	1,02	1,02	0,57	0,84	1,08	N. S.
	Durée de l'aoûtement (Ripening of canes duration)	70	70	70	70	70	70	
	Poids des bois (Canes weight).....	1,41	1,67	1,39	0,71	1,34	1,47	11 < 1-9-10-12-13 **

[ ] Période d'application de la contrainte.
** $P < 0,01$.
N.S. Nonsignificatif.

II. — Résultats

2.1. — *Exploration du cycle de la vigne*

2.11. *Effets de la sécheresse sur l'appareil végétatif.*

2.111. *Croissance des rameaux et aoûtement.*

Les effets de la sécheresse sur la croissance et l'aoûtement ont été reproductibles au cours des 3 années. Les résultats de 1973 ayant été publiés antérieurement (Mériaux *et al.*, 1974*a*), seuls ceux de 1974 sont portés sur le tableau 1.

La sécheresse réduit la *vitesse de croissance* avec un décalage de 1 semaine, qui n'apparaît pas sur le tableau 1 où figurent des moyennes par période de 3 semaines. Lorsque la contrainte est levée en phase de croissance active (de juin à début août), la croissance reprend avec un rythme accéléré, supérieur à celui du témoin : c'est le cas des traitements 9 et 10.

L'*aoûtement* débute lorsque la vitesse moyenne de croissance calculée par semaine devient inférieure à 0,80 cm j^{-1}, indépendamment de la date (Mériaux *et al.*, 1974*a*). La sécheresse contribue à avancer le phénomène et à modifier sa progression mais sa durée reste constante (70 jours).

Le *poids des bois* est fortement affecté par la contrainte hydrique débutant à la mi-juillet (traitement 11).

2.112. *Composantes du rameau* (tabl. 2).

La sécheresse interrompt l'émission des mérithalles qui reprend après la levée de la contrainte avec un décalage d'environ 2 semaines. Lorsque la sécheresse est précoce (traitement 9), le rythme de reprise semble accéléré par rapport au témoin bien alimenté en eau (traitement 1) : le nombre final de mérithalles n'est plus différencié en fin de saison.

TABLEAU 2

Variation du nombre moyen de mérithalles au cours du temps (exemple de 1974)
Variation of the mean number of internodes with time (example 1974)

N° du traitement	Dates de mesure										
	26/6	3/7	10/7	17/7	24/7	31/7	7/8	14/8	21/8	28/8	4/9
1	22	25	29	33	37	40	45	48	51	52	53
9	17	18	23	28	31	35	40	44	49	51	51
10	23	24	25	26	27	31	34	38	42	44	44
12	21	24	26	30	33	36	38	38	39	39	39
13	21	25	30	34	38	42	46	49	53	53	53

N.B. — Les mesures n'ont pu être effectuées sur le traitement 11 pour des raisons accidentelles.
[ ] Période d'application de la sécheresse (location of drought).
Le traitement 9 a subi la sécheresse du 4/6 au 24/6 (Number 9 was stressed from 4/6 to 24/6).
Le traitement 13 a subi la sécheresse du 27/8 au 16/9 (Number 13 was stressed from 27/8 to 16/9).

TABLEAU 3

Longueur finale (en cm) *des mérithalles* (Exemple de l'année 1974)
Total lenght (cm) *of internodes* (Example 1974)

Traitements	Rang du mérithalle					
	15	20	25	30	35	40
1.....	7,5	6,5	5,5	6,0	6,0	4,0
9.....	4,5	4,5	6,0	5,0	6,5	7,5
10.....	7,0	6,0	3,5	2,5	6,0	5,0
12.....	6,0	6,0	5,8	7,5	5,0	
13.....	5,2	5,0	6,0	5,0	6,0	7,0
Signification des différences	9 < 1-10-12-13 **	9 < 1-10-12 **	10 < 1-9-12-13 **	10 < 1-9-12-13 **	12 < 9 *	1 < 9-13 **

Les mesures n'ont pu être effectuées sur le traitement 11 pour des raisons accidentelles.
[ ] Mérithalles en cours de croissance lors de l'application de la sécheresse (Internodes growing during the stress).
* $P < 0,05$.
** $P < 0,01$.

TABLEAU 4

Surface moyenne des feuilles apparues durant les périodes III à V, nombre de feuilles d'un rameau et surface foliaire totale (1974)

Mean area of leaves appeared during periods III to V, leaf number of one twig and total leaf area (1974)

	1	9	10	11	12	13	Signification des différences
Surface (cm^2) des feuilles apparues durant la période (Mean area of leaves appeared during period) :							
III (26/06-16/07)	112,6	69,9	83,0	101,4	104,2		9 < 1-11-12 ** 10 < 1 *
IV (17/07-6/08)	61,3	86,9	48,6	70,0	74,6		10 < 9-11-12 *
V (7/08-17/08)	74,5	102,7	80,3		53,0		9 < 12-1 **
Nombre de feuilles d'un rameau (Leaves number of one twig)	53	51	44	39	53	49	
Surface moyenne (cm^2) d'une feuille (Mean area of one leaf (cm^2))	77,9	81,9	75,2	84,6	84,6	81,0	N. S.
Surface totale (m^2) de la souche (Total leaf area of one plant (m^2))	4,96	5,16	3,97	3,97	5,37	4,76	10-11 < 9-12 *

[ ] Période d'application de la contrainte.
—— Période qui suit la contrainte.
* $P < 0,05$.
** $P < 0,01$.

Les mérithalles en cours de croissance lors de l'application de la sécheresse sont réduits dans leur longueur (tabl. 3).

2.113. *Composantes de la surface foliaire* (tabl. 4).

Le *nombre* de feuilles par rameau est évidemment identique au nombre de mérithalles.

La *surface* des feuilles en cours de croissance lors de l'application de la contrainte et dans la période qui suit est réduite pour les traitements 9 et 10. On observe une reprise accélérée de croissance très tardivement après cessation de la sécheresse dans le cas du traitement 9 : la surface des feuilles apparues au cours de la période V est significativement supérieure à celle du témoin (traitement 1) alors que la contrainte hydrique a été subie en période II.

La surface foliaire moyenne d'une feuille n'est pas affectée par la réduction de surface de certaines feuilles. La surface totale de la souche n'est influencée que par le nombre de feuilles.

2.12. *Effets de la sécheresse sur l'appareil reproducteur.*

2.121. *Nombre d'inflorescences.*

Rappelons que les grappes d'une année n sont initiées au cours de l'année n — 1. Ainsi le nombre d'inflorescences sorties au printemps 1975 (tabl. 5) se rapporte aux traitements hydriques de 1974. Les différences constatées entre les traitements ne s'observent que pour les bourgeons de rang 1 à 10 : les traitements sans restriction hydrique (n° 1) ou à restriction tardive (n° 13) présentent des inflorescences moins nombreuses que les autres. Un examen plus précis montre qu'en réalité les inflorescences sont présentes mais les bourgeons ne débourrent pas.

TABLEAU 5

Nombre d'inflorescences et nombre de bourgeons non débourrés pour les rangs 1 *à* 10
Comptage d'avril 1975
(les résultats d'une année concernent les traitements hydriques de l'année précédente)

Number of bunch primordia and number of unburst buds for nodes 1 *to* 10
Measures of April 1979
(Water treatments affect the results of the next year)

Traitement	Nombre d'inflorescences	Nombre de bourgeons non débourrés (sur 10)
1	17,5	4,0
9	23,5	3,25
10	20,5	2,75
11	21,25	1,75
12	21,5	1,5
13	13,0	4,5
Signification	1-13 < 9-10-11-12 **	1-13 > 11-12 *

* $P < 0,05$.
** $P < 0,01$.

2.122. *Véraison.*

Les différences significatives portent sur la date de début de véraison avancée de 3 jours pour le traitement 11, sur la date de fin de véraison avancée de 4 jours pour le traitement 12 et sur la durée du phénomène, écourtée de 3 jours pour ce même traitement.

2.123. *Le rendement et ses composantes* (tabl. 6).

Les effets globaux sur le rendement résultent de deux effets élémentaires, l'un sur le nombre de baies, l'autre sur le poids moyen de la baie. La sécheresse réduit le poids moyen des baies (traitements 10-11-12) mais le rendement final n'est significativement affecté que pour le traitement 10 dont le nombre de baies est inférieur aux autres par suite d'une chute de grains due au flétrissement des grappes en fin de contrainte.

TABLEAU 6

Rendement et degré (1974)
Yield and alcoholic degree (1974)

Traitements (Treatments)	Nombre de baies par souche (Number of berries)	Poids moyen d'une baie (g) (Mean weight of one berry) (g)	Poids de raisins par souche (kg) (Weight of grapes per plant) (kg)	Sucres (g/l) (Sugar) (g/l)	Degré d'alcool probable (Alcoholic degree)
1	4,396	1,374	6,04	205,4	11,74
9	3,725	1,423	5,30	204,5	11,68
10	4,171	1,230	5,13	203,5	11,63
11	4,506	1,233	5,63	196,7	11,24
12	5,678	1,210	6,87	188,6	10,78
13	4,587	1,415	6,49	205,4	11,74
Signification	9 < 1-11-12-13 *	1-9-13 > 10 *-11 *-12 **	10 < 1-12-13 *	12 < autres **	12 < autres

* $P < 0,05$.
** $P < 0,01$.

2.124. *Teneur en sucres et degré* (tabl. 6).

La teneur en sucres est significativement abaissée pour le traitement 12.

2.13. *Synthèse des effets.*

Elle est schématisée sur la figure 2 : les effets de la sécheresse sur les phénomènes de croissance, qu'il s'agisse des organes végétatifs ou des baies, se produisent principalement avant la véraison, tandis que l'action sur la teneur en sucres a lieu au moment de la véraison.

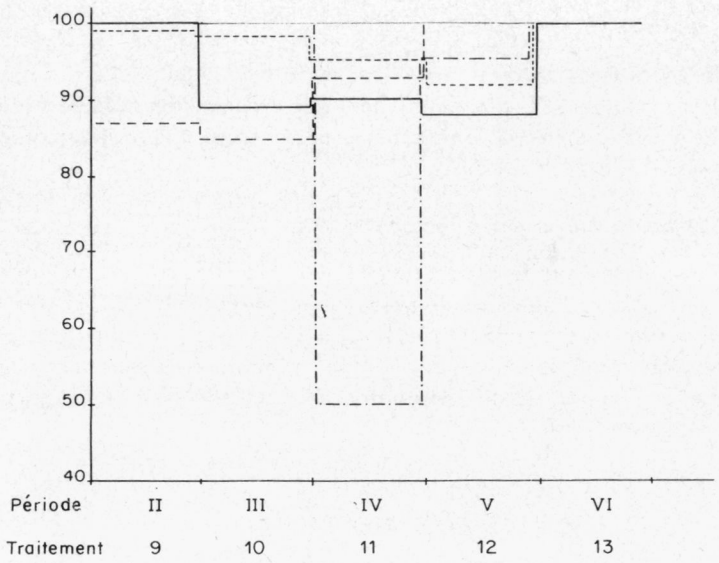


FIG. 2. — *Synthèse des effets de la sécheresse sur la vigne.*
Synthesis of water stress on vine.
——— poids d'une baie (weight of one berry).
— — — poids de raisins (weight of grapes).
- - - - - - teneur en sucres (Sugar content).
— · — poids des bois (weight of canes).

2.2. — *Simulation des conditions climatiques méditerranéennes*

Quatre niveaux d'alimentation hydrique : 1, 0,66, 0,33 et 0,17 TM ont induit des contraintes que nous dénommerons respectivement :

0 (zéro), f (faible), F (Forte) et T.F. (Très Forte).

2.21. *Effets de la sécheresse sur les composantes de l'appareil végétatif.*

2.211. *Composante du rameau.*

Le *nombre de mérithalles* n'est pas modifié par la contrainte faible. Par contre, l'arrêt de leur émission par la contrainte forte, temporaire lorsque cette contrainte ne dure que 21 jours (§ 2.1.1.2), est définitif lorsque la sécheresse est appliquée pendant deux ou trois périodes. Il en est de même pour la contrainte très forte. Le nombre de mérithalles (NM) est lié au déficit relatif de transpiration DRT ((TM — TR)/TM avec TM = transpiration maximale, TR = transpiration réelle) calculé pour l'ensemble des périodes I à V. (La période VI n'est pas prise en compte car elle débute fin août lorsque la croissance est terminée). Pour 1974, l'équation de régression est la suivante :

$$NM = 49{,}8 - 26\ DRT \qquad r = 0{,}866\ ^{***}.$$

Quant aux *dimensions des mérithalles*, elles ne sont affectées que par la contrainte faible (en moyenne 25 p. 100 en longueur et en diamètre) car les contraintes fortes et très fortes interrompent l'émission. Soulignons toutefois l'effet de la contrainte très

forte (0,17 TM) sur le diamètre des mérithalles émis avant son application ; ce diamètre diminue progressivement au cours du temps pour atteindre les trois quarts de sa valeur initiale fin août : ainsi, par exemple, le diamètre du mérithalle de rang 20 passe de 5,5 cm le 25/07/74 à 4,0 cm le 22/08/74, celui de rang 24 de 4,0 cm à 3,0 cm entre les mêmes dates.

2.212. *Croissance des rameaux et aoûtement.*

Les résultats de l'année 1973 ont été publiés par ailleurs (Mériaux *et al.*, 1974*a*) et complétés au cours des années 1974 et 1975. Les effets de la sécheresse sont résumés dans le tableau 7 qui fait apparaître différents cas de l'histoire hydrique des plantes : l'action de la contrainte faible n'est sensible qu'aux périodes II et III (cas A et B), celle de la contrainte forte est plus importante que la précédente (cas D.E.F.) et, lorqu'elle est appliquée durant deux périodes consécutives (cas G), conduit à l'arrêt de croissance ; quant à la contrainte très forte (cas H), elle se traduit après 2 semaines par la chute de l'apex.

TABLEAU 7

Effets des contraintes hydriques sur la vitesse moyenne de croissance des rameaux (1974)
Effects of water stress on mean spead of twig growth (1974)

Alimentation hydrique relative à celle du témoin (Water supply related to the control)	Cas (Case)	Contrainte (Stress)	Période d'application (Location of stress)	Contrainte à la période précédente (Stress in the past period)	Vitesse moyenne journalière de croissance relative à celle du témoin (Daily mean speed of growth related to the control)	Vitesse du témoin (cm.J ^{1}) (Control speed)
0,66	A	faible (f)	II	O	0,58 (0,46 à 0,68)	2,51
	B		III	f	0,49 (0,37 à 0,62)	2,60
	C		IV	f	0,93 (0,87 à 1)	2,27
0,33	D	forte (F)	III	O	0,30 (0,26 à 0,34)	2,60
	E		IV	O ou f	0,23 (0,19 à 0,27)	2,27
	F		V	f	0,26 (0,24 à 0,28)	1,26
	G		V	F	0,04 (0,02 à 0,07)	1,26
0,17	H	très forte (TF)	IV	F	0	2,27

De nombreuses corrélations ont été mises en évidence au cours des 3 années entre la taille des rameaux ou sarments et l'alimentation hydrique. Nous citerons celles de 1974 :

La *longueur finale du rameau* (LR) est liée négativement au déficit relatif de transpiration (DRT) de la plante au cours des périodes 1 à 5 :

$$LR\ (cm) = 301 - 249\ DRT \qquad r = -0{,}884\ ^{***}. \qquad (1)$$

Cette longueur peut être traduite en fonction de l'eau transpirée :

$$LR\ (cm) = 77 + 0{,}195\ T\ (l) \qquad r = 0{,}652\ ^{***}. \tag{2}$$

Elle est, par ailleurs, liée au nombre de mérithalles (NM) :

$$LR\ (cm) = -93 + 7{,}4\ NM \qquad r = 0{,}860\ ^{***}. \tag{3}$$

L'aoûtement est aussi en relation avec l'intensité globale de la sécheresse : la longueur du sarment aoûté (LA) est liée au déficit de transpiration par une équation linéaire qui ne diffère de l'équation (1) que par l'ordonnée à l'origine :

$$LA\ (cm) = 252 - 243\ DRT \qquad r = -0{,}924\ ^{***}. \tag{4}$$

Ce résultat montre que la fraction non aoûtée du rameau est indépendante des traitements hydriques (environ 50 cm). On obtient le même ordre de grandeur de cette fraction en utilisant l'équation qui lie LA à l'eau transpirée :

$$LA\ (cm) = 19 + 0{,}203\ T\ (l) \qquad r = 0{,}714\ ^{***}. \tag{5}$$

Le *poids des sarments* (PS) qui intègre leur longueur et leur diamètre est aussi fonction de l'eau transpirée :

$$PS\ (g) = -204 + 1{,}696\ T\ (l) \qquad r = 0{,}917\ ^{***} \tag{6}$$

2.2.1.3. *Composantes de la surface foliaire.*

Le *nombre de feuilles* subit avec la sécheresse les mêmes variations que le nombre de mérithalles.

La *surface des feuilles* apparues durant les périodes de contrainte faible est réduite de 30 à 35 p. 100 mais, comme on l'a vu antérieurement (§ 2.1.1.3) cet effet est estompé au niveau de la surface foliaire totale (SFT) qui s'avère liée seulement au nombre de feuilles (NF).

$$SFT = -349 + 87\ NF \qquad r = 0{,}965\ ^{***}. \tag{7}$$

2.22. *Effets de la sécheresse sur le fonctionnement des feuilles.*

2.221. *Transpiration* (tabl. 8).

La transpiration globale est donnée par le bilan des lysimètres. Quelques mesures complémentaires ont eu pour but de préciser certains points du fonctionnement transpiratoire des plantes.

L'ouverture des stomates. Elle est sensible à la contrainte très forte (traitement 18). Ce résultat laisse penser que la contrainte forte ne joue pas sensiblement sur les échanges dans les conditions de nos mesures (fin de matinée).

La *température du feuillage*. Elle traduit le comportement global du feuillage sous l'angle de la transpiration. Les trois niveaux de sécheresse (nulle = traitement 1, forte = traitements 16-17 et très forte = traitement 18) sont bien différenciés en début de période VI par temps ensoleillé. A la fin de cette période, par temps couvert, seul subsiste un effet lié à la sécheresse forte et très forte, que la mesure soit réalisée au niveau du feuillage seul (1,90 m du sol) ou au niveau des grappes (1,55 m du sol).

TABLEAU 8

Mesures d'activité transpiratoire
Measures of transpiration activity

N°	1	1 *bis*	15	16	17	18	
Rappel du traitement	TM de I à VI	0,33 TM en I-II TM de III à VI	0,66 TM de I à IV 0,33 TM en V-VI	TM de I à III 0,33 TM de IV à VI	0,66 TM de I à III 0,33 TM de IV à VI	TM en I-II 0,33 TM en III 0,17 TM de IV à VI	Signification des différences
Infiltration (*Infiltration*) selon code (1)							
— 1er jour de période V (6/8/74)	2,9		2,2	1,7	1,5	0,7	1 > 18 *
— 2e jour de période IV (10/7/75)	3,2	3,5			2,5	0,5	18 < 1-1 *bis*-17 **
Résistance à la diffusion ($s.cm^{-1}$) (*Stomatal resistance*)							
— 2e jour de période IV (10/7/75)	1,54	0,98			1,12	28,00	18 > 1-1 *bis*-17 **
Température de surface du feuillage (*Leaf surface temperature*)							
— début de période VI 27/8/74 (temps ensoleillé) à 1,90 m du sol	24,7			27,2	26,5	28,2	1 < 16-17 < 18 *
— fin de période VI 12/9/74 (temps couvert) à 1,90 m du sol.....	23,0			25,1	24,7	24,7	1 < 16-17-18 *
— au niveau des grappes 12/9/74 à 1,55 m du sol	24,4			26,1	26,1	26,5	1 < 16-17-18 *

(1) Code d'infiltration = 0 infiltration nulle.
1 infiltration très faible.
2 infiltration faible.
3 infiltration moyenne.
4 infiltration forte.
5 infiltration très forte.

* $P < 0,05$.
** $P < 0,01$.

2.222. *Activité photosynthétique.*

Les résultats publiés par ailleurs (Mériaux *et al.*, 1974-1975) ont montré que la masse sèche surfacique est liée à la transpiration spécifique (transpiration par unité de surface de feuilles) pour les vingt premières feuilles, par l'équation :

$$MSS/MSS \text{ témoin} = 0{,}11\ TS/TS \text{ témoin} + 0{,}89 \qquad r = 0{,}81\ ** \qquad (8)$$

Toutefois, lorsque la contrainte faible a précédé la contrainte forte, une réduction de surface des cellules s'est produite qui permet une activité photosynthétique semblable à celle du témoin alors qu'elle est sans effet sur la transpiration.

2.23. *Effets de la sécheresse sur l'appareil reproducteur.*

2.231. *Nombre d'inflorescences* (tabl. 9).

Comme pour les traitements de 9 à 13, le nombre d'inflorescences du témoin est inférieur à celui des traitements de sécheresse, en raison d'un nombre plus élevé de bourgeons non débourrés dans les dix premiers rangs. Ce résultat n'est toutefois pas confirmé en 1976.

TABLEAU 9

Nombre d'inflorescences (I) et nombre de bourgeons non débourrés (N. D.) pour les rangs de 1 *à* 10
(les résultats d'une année concernent les traitements hydriques de l'année précédente)
Number of bunch primordia (I) and number of unburst buds (N. D.) for nodes 1 *to* 10
(water treatments affect the results of the next year)

Année du comptage		N° du traitement						
		1	1 *bis*	15	16	17	18	Signification des différences
1974	I	12,25		21,0	23,25	16,25		1 < 15-16 *
1975	I	17,5	12,7 (1)	24,25	20,5	29,75	18,25	1-1 *bis* < 15-17 *
	N. D.	4	4,5	0,25	1,5	0,5	1,75	1-1 *bis* > 15-17 *
1976	I	16	17,75	15,25	13,75	17,25	14,75	NS
	N. D.	0,5	1,0	0,75	2,0	0,5	1,0	NS

(1) En 1974, le traitement hydrique du n° 1 *bis* correspondait à la transpiration maximale (= n° 1).
* $P < 0{,}05$.
NS = différences non significatives.

2.232. *Véraison.*

En l'absence de sécheresse (traitement 1), la véraison s'accomplit en 15 jours. La sécheresse très forte (traitement 18) avance le début du phénomène de 6 jours, ce qui en accroît d'autant la durée. La sécheresse forte entraîne deux comportements différents selon qu'elle est appliquée au moment de la véraison à la période V ou préalablement, à la période IV. Dans le premier cas (traitements 14 et 15), la date de début de véraison n'est pas modifiée mais la durée du phénomène est réduite de 6 jours. Dans le second cas, le début est avancé de 3 jours mais la durée reste inchangée.

2.233. *Le rendement et ses composantes* (tabl. 10).

Pour l'ensemble des résultats des années 1974 et 1975, le *poids des baies* (en g) est lié à l'eau transpirée (T en l) par l'équation :

$$\text{Poids de 100 baies} = 0{,}057\ T + 79{,}4 \qquad r = 0{,}754\ ^{***}.$$

Le poids de la récolte (PR) est fonction du poids des baies :

$$PR = 38\ P\ 100\ \text{baies} + 530 \qquad r = 0{,}673\ ^{***}.$$

TABLEAU 10

Rendement et degré (1)

Yield and alcoholic degree (see table 7)

Traitements	1	1 *bis*	14	15	16	17	18	Signification des différences
Nombre de baies par souche								
1974	4 056		4 529	3 438	4 106	3 583	3 668	NS
1975	2 787	2 656		2 806	3 649	3 795	2 904	1-1 *bis*-15-18 < 16-17 *
Poids moyen d'une baie (g)								
1974	1,37		1,20	1,20	1,21	1,22	0,83	1 > 14-15-16-17 > 18**
1975	1,29	1,14		1,40	1,16	1,08	0,71	18 < 1-1*bis*-15-16-17 *
Poids de raisins par souche (kg)								
1974	6,04		6,11	4,58	5,40	4,91	3,25	1-14 > 15-17*-18**
1975	3,62	2,95		3,77	4,17	4,12	2,07	1 *bis*-18 < 1-15-16-17 *
Sucres ($g.l^{-1}$)								
1974	205,4		175,2	195,5	189,6	204,4	192,0	1-17 > 14-15-16-18 *
1975	185,7	187,3		191,8	191,9	185,1	192,9	NS
Degré d'alcool probable								
1974	11,7		10,0	11,2	10,8	11,7	11,0	1-17 > 14-15-16-18 *
1975	10,6	10,7		11,0	11,0	10,6	11,0	NS

(1) En 1973, 1re année de récolte, les rendements étaient très faibles (inférieurs à 1,4 kg par pied) et non significatifs.
* $P < 0{,}05$.
** P/0,01.

Le *nombre de baies* n'est pas directement affecté par la contrainte hydrique de l'année, si ce n'est en 2e année de sécheresse très forte par chute de grains (traitement 18, 1975). Par contre, le nombre de baies des traitements 1 et 1 *bis* en 1975 semble en relation avec le plus faible nombre d'inflorescences constaté pour ces traitements (tabl. 9). Il en découle un abaissement du poids de récolte.

En 1974, la teneur en sucres est abaissée par la sécheresse, à l'exception du traitement 17. Une corrélation positive a été obtenue entre le degré alcool probable (D) et l'eau transpirée (T en l) :

$$D = 0{,}0017\ T + 9{,}81 \qquad r = 0{,}567\ ^{***}.$$

Toutefois, aucun effet n'a été observé en 1975.

2.3. — *Rôle de la surface foliaire en conditions hydriques non limitantes* (tabl. 11)

2.31. *Consommation d'eau.*

D'après les données classiques, la transpiration croît avec la surface foliaire de manière moins que proportionnelle et tend vers un palier lorsque l'indice foliaire correspond à un couvert fermé.

TABLEAU 11

Rôle de la surface foliaire en conditions hydriques non limitantes
Influence of leaf area in a non limited water supply

N° du traitement	A	B	C	D	Signification des différences
Hauteur du feuillage (m) (Foliage height) (m)	2,5 (illimité)	1,70	1,20	0,70	
Rapport des hauteurs (Height ratio)	1	0,68	0,48	0,28	
Consommation d'eau (Water consumption) :					
— En l (In litres)					
1974	1 163	1 028	973	788	A-B-C > D
1975	1 022	751	591	504	A > B > C-D
— Rapportée au traitement A (Related to treatment A)					
1974	1	0,88	0,84	0,68	
1975	1	0,73	0,58	0,49	
Nombre d'inflorescences (Number of bunch primordia) (bourgeons de rang 1 à 10) (nodes 1 to 10)					
1975 (1)	16,75	20,5	31,75	39,75	A-B < C-D **
1976 (1)	13,75	15,25	17,5	19,25	NS
Nombre de bourgeons non débourrés (Number of unburst buds) (bourgeons de rang 1 à 10) (nodes 1 to 10)					
1975 (1)	3,75	2,25	0,5	0,5	A-B > C-D **
1976 (1)	1,10	0,25	0,75	0,75	
Poids de raisins par souche (kg) (Weight of grapes per plant) (kg)					
1974	6,96	6,74	6,68	6,71	NS
1975	3,90	3,48	3,90	3,62	NS
Sucres (g/l) (Sugar)					
1974	210,8	208,6	202,1	174,4	D < A-B-C *
1975	190,7	187,9	155,5	158,2	C-D < A-B *
Degré alcool probable (Alcoholic degree)					
1974	12,1	11,7	11,6	10,0	D < A-B-C *
1975	10,9	10,7	8,9	9,1	C-D < A-B *

(1) Le nombre d'inflorescences mesurées une année se rapporte au traitement de l'année précédente. (The number of bunch primordie is related to the treatment of the last yeer).
* $P < 0,05$.
** $P < 0,01$.

Dans le cas de la Vigne, conduite selon un palissage vertical, la variation est sensiblement linéaire. Si nous exprimons les quantités d'eau transpirées (T) relativement à celles du traitement A sans limitation de développement foliaire (T/T max), leur variation est linéaire en fonction de la surface foliaire représentée par la hauteur du feuillage (HF) exprimée par rapport à celle du traitement A (HF/HF max). Les conditions évaporantes de l'année et l'activité des surfaces interviennent pour différencier les équations des droites :

$$1974 \text{ — } T/T \text{ max.} = 0{,}62 + 0{,}38 \text{ HF/HF max.}$$
$$1975 \text{ — } T/T \text{ max.} = 0{,}22 + 0{,}78 \text{ HF/HF max.}$$

2.32. *Nombre d'inflorescences.*

On constate en 1975 un nombre d'inflorescences d'autant plus faible que la hauteur du feuillage imposée en 1974 a été plus forte. Le phénomène s'explique par l'augmentation du nombre de bourgeons non débourrés.

2.33. *Caractéristiques de la récolte.*

Le poids de raisins par souche n'est pas affecté par la diminution de surface foliaire, mais la teneur en sucres l'est très fortement : environ 35 g/l, soit l'équivalent de 2° d'alcool pour les réductions les plus fortes.

III. — Discussion

3.1. — *Sensibilité de la Vigne à la sécheresse au cours de son cycle*

La figure 2 montre qu'une sécheresse forte (T = 0,33 TM) appliquée durant une seule période de 21 jours a, sur les phénomènes de croissance et d'accumulation des sucres, une action d'autant plus marquée que le phénomène considéré est dans une phase plus active.

Toutefois, pour les *organes végétatifs*, la croissance accélérée qui suit la levée de contrainte en phase active (de juin à mi-août) permet aux plantes des traitements 9 et 10 de rattraper le témoin quant à la taille des rameaux et au poids des bois. Ce résultat confirme pour la Vigne le phénomène mis en évidence sur betterave (Robelin et Mingeau, 1970) et observé, depuis, sur d'autres cultures.

La croissance des baies subit les effets de la contrainte hydrique au cours de ses deux phases : le *poids d'une baie* est réduit de 10 p. 100 au cours de la phase de multiplication et grandissement cellulaires qui s'étend de la nouaison à la véraison (périodes III et IV) et de 12 p. 100 après la véraison (période V) lorsque la croissance est due à l'accumulation des sucres et de l'eau.

Le *nombre de baies* est affecté par la sécheresse dans la période I qui encadre la floraison et la nouaison (traitement 9, tabl. 6). Si l'on prend en compte les résultats de 1974 (tabl. 6) pour lesquels le nombre de baies du traitement 1 n'est pas pénalisé par l'arrière-action de 1973 (en 1973, 1er année de plantation, de traitement et de récolte, la production a été très faible et aucune des variables mesurées ne présentait de différence significative entre les traitements hydriques), l'effet global de la sécheresse

sur la résultante des deux composantes de la récolte (poids unitaire des baies et nombre de baies) est significatif pour la période III (traitement 10) et voisin de la signification ($P < 0,07$) pour les périodes II et IV (traitements 9 et 11).

Quant à la *teneur en sucres* des baies, elle est réduite de 8 p. 100 par un stress hydrique à la véraison (période V). Le pourcentage pondéral de pulpe dans la baie étant en moyenne de 75 p. 100 pour le Cabernet-Sauvignon, la diminution pondérale de sucres est de l'ordre de 11 p. 100, ce qui représente la quasi-totalité de la réduction de poids de 12 p. 100 d'une baie : c'est donc essentiellement le transfert des sucres qui est affecté par la sécheresse à cette période.

Ce dernier résultat est conforme à ceux que Alleweldt et Hofäcker (1975) ont obtenus en pots sur Riesling, Muller-Thurgau et Bacchus : le stockage des sucres dans la baie est ralenti par un manque d'eau durant la période de maturation. Cette action de la sécheresse sur la teneur en sucres des raisins peut être rapprochée de celle que Robelin et Mingeau (1970) ont observée sur betterave et interprétée par rapport à la notion de seuil de sécheresse. Ce seuil marque la limite en dessous de laquelle la sécheresse altère le métabolisme et diminue en particulier le stockage des sucres. Au-dessus de ce seuil, l'accumulation des sucres, non perturbée, se produit dans un volume plus faible, car la réduction de photosynthèse liée à la sécheresse se répercute d'abord sur l'élaboration des tissus. Il en résulte un effet de concentration qui se traduit par une teneur en sucres plus élevée que celle du témoin à la transpiration maximale.

Ce schéma permet d'expliquer les résultats apparemment contradictoires signalés dans l'introduction : dans la plupart des essais d'irrigation au champ, le seuil de sécheresse n'est pas atteint et l'effet de concentration joue ; dans certains essais au champ, comme dans les essais en pots, les conditions de sécheresse sont suffisamment drastiques pour se situer en deçà du seuil.

3.2. — *Relations entre la teneur en sucres, la surface foliaire et le rendement*

La surface foliaire est représentée par la hauteur du feuillage (HF).

3.21. *Disponibilité de l'eau non limitante.*

Cette condition est réalisée dans l'étude sur le rôle de la surface foliaire ainsi que pour les traitements conduits à la transpiration maximale durant la totalité ou la majorité du cycle : n° 1, 1 *bis*, 9, 10, 13 et n'affectant pas la teneur en sucres.

Si nous représentons (fig. 3) la variation de la teneur en sucres avec la surface foliaire par unité de rendement (HF/PG) pour l'année 1974, nous constatons que la pente de la courbe, d'abord très forte pour les faibles valeurs de HF/PG, s'atténue et atteint un palier à partir de HF/PG = 30, c'est-à-dire pour des hauteurs de feuillage supérieures à 1,70 m. Cette variation asymptotique traduit, d'une part, qu'au-delà de cette valeur, une partie du feuillage est exédentaire par rapport aux besoins de croissance des baies et d'accumulation des sucres correspondant au potentiel de la variété et au système de conduite (palissage...), d'autre part, que les hauteurs de 0,70 m et de 1,20 m sont, au contraire, insuffisantes pour que ce potentiel puisse s'exprimer ; dans ce cas, la compétition pour les produits de la photosynthèse, sans répercussion au niveau de la croissance des baies (le rendement n'est pas réduit), apparaît nettement dans l'accumulation ultérieure des métabolites.

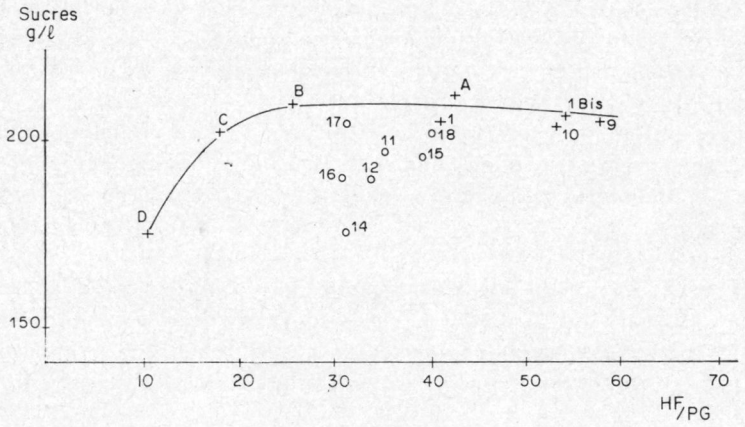


FIG. 3. — *Variation de la teneur en sucres avec la surface foliaire (HF) par unité de rendement (PG).*

\+ Traitement à alimentation hydrique non limitante.
o Traitement de sécheresse.
A-B-C-D : traitements concernant le rôle de la surface foliaire.
1-9 à 18 : traitements concernant l'eau.

Variation of sugar content with leaf area (HF) per yield unit (PG)

\+ Non limiting water supply.
o Water stress.
A-B-C-D : Leaf area treatments.
1-9- to 18 : Water treatments.

3.22. *Disponibilité en eau limitante.*

Elle caractérise tous les traitements de sécheresse qui, sur le graphique, sont représentés en dessous de la courbe précédente, mais de façon anarchique étant donnée la diversité de localisation de la sécheresse au cours du cycle. L'effet de cette sécheresse sur la teneur en sucres se surimpose à celui de la surface foliaire par unité de rendement.

Ces résultats peuvent conduire à préconiser dans la pratique viticole une conduite de palissage limitant le feuillage à une hauteur optimale supérieure à 1,20 m et n'excédant pas 1,70 m.

3.3. — *Relation entre l'eau et la fertilité des bourgeons*

La fertilité, ou nombre moyen de grappes par sarment, dépend de la variété, du rang des bourgeons et des conditions de milieu (Huglin, 1958).

L'effet d'un stress hydrique sur *l'initiation florale* a été mis en évidence en conditions contrôlées par Buttrose (1974). D'après nos résultats (tabl. 5 et 9), seul le traitement 18 semble montrer une réduction du nombre d'inflorescences en 1975. Ce traitement est caractérisé par une sécheresse forte en période III (après la nouaison en 1974) et une sécheresse très forte aux périodes IV, V et VI (à partir du 16 juillet 1974). Pour Carolus (1970), dans le Bordelais, sur Merlot, l'initiation florale débute environ 6 semaines après le débourrement, et les dix premiers bourgeons d'un sarment ont terminé leur initiation avant la véraison. A ce stade qui, dans notre protocole, se situe en période IV, différents traitements ont subi une sécheresse forte durant une

période : traitements 9, 10, 11, 16, 17 avec, pour ce dernier, un prétraitement de sécheresse faible. Seul le traitement 18 subit une contrainte très forte qui suit une contrainte forte. On peut donc penser que la durée et surtout l'intensité de la sécheresse conditionnent son action sur l'initiation florale.

Nos résultats ont mis en évidence 2 années sur 3 l'effet d'une alimentation en eau non limitée sur l'accroissement du nombre de bourgeons non débourrés et, en conséquence, sur la diminution du nombre d'inflorescences sorties. Il ne s'agit donc pas ici d'un effet sur l'initiation florale, mais d'une répercussion sur le phénomène de *dormance ou de corrélations inhibitrices*.

Si l'on prend en compte les traitements les plus différenciés par le nombre des inflorescences de rang 1 à 10, il est possible de constituer deux lots qui sont départagés par certains paramètres de vigueur et de précocité (tabl. 12) : les bourgeons non débourrés sont d'autant plus nombreux que la vigueur est plus élevée et la précocité moindre.

TABLEAU 12

Paramètres caractéristiques des deux lots de plantes différenciées par les inflorescences de rang 1 à 10
Characteristic parameters of the two lots of plants differentiated from bunch primordia for nodes 1 to 10

Traitement et nature de la contrainte (Treatment and stress intensity)	Lot I 1-13-A-B contrainte nulle	Lot II 15 à 17 : sécheresse C-D : réduction de surface foliaire
Nombre d'inflorescences (rang 1 à 10) (Number of bunch primordia) (nodes 1 to 10)	< 20	> 24
Nombre de bourgeons non débourrés (rang 1 à 10) (Number of unburst buds) (nodes 1 to 10)	⩾ 2	⩽ 0,5
Longueur finale du rameau (cm) (Total lenght of the twig) (cm)	⩾ 170	⩽ 180
Longueur du sarment aoûté (cm) (Lenght of the cane) (cm)	⩾ 170	⩽ 140
Poids des bois (kg) (Cane weight) (kg)	> 1	⩽ 0,70
Date de débourrement (Bud burst date)	J	J-5
Température minimale lors de l'arrêt de croissance (°C) (Minimum temperature at the growth stop)	⩽ 15	> 16

Il ne s'agit pas de l'effet d'un taux élevé d'hydratation sur le débourrement, effet signalé dès 1898 par Ravaz, puis par d'autres auteurs (Branas *et al.*, 1946) : en effet, à l'époque du débourrement, les plantes de tous les traitements sont bien alimentées en eau par suite du lessivage hivernal de prévention de la salinité.

Tout se passe comme si les bourgeons des plantes témoins, particulièrement ceux de la base, présentaient un état de dormance plus intense que ceux des plantes soumises à la sécheresse, ce qui induirait le long du sarment, dans la phase de croissance avant le débourrement, une hétérogénéité génératrice d'inhibition (Bessis, 1965 ; Huglin, 1958 ; Nigond, 1967).

A l'appui de ce schéma, on peut faire intervenir l'action des facteurs susceptibles d'agir sur la dormance. D'après Nigond (1967), peuvent intervenir :

— les entrecœurs qui sont beaucoup plus nombreux dans les plantes témoins et dont l'action est positive sur la dormance,

— la température qui, lors de l'entrée en dormance (concomitante de l'arrêt de croissance), est plus faible de 2 °C au niveau du feuillage dans les plantes témoins.

Il est aussi possible que l'équilibre auxine-inhibiteur de croissance qui conditionne la dormance (Pouget, 1963) soit différent dans les plantes témoins et stressées.

Le phénomène de débourrement anticipé après des pluies consécutives à une période de sécheresse a été mis en évidence par Chouard (1951) sur cerisiers, pommiers et lilas.

Le fait que la différence du nombre d'inflorescences ne soit observée que 2 années (sorties 1974 et 1975) sur 3, peut être expliqué par la suppression des entrecœurs en 1975, et par des températures hivernales plus rigoureuses durant l'hiver 1975-1976, susceptibles de réduire la vitesse de croissance des bourgeons avant le débourrement et, en conséquence, de diminuer l'hétérogénéité le long du sarment et l'inhibition qui en résulte. On a, en effet, observé durant les trois hivers les températures suivantes :

	1973-1974	1974-1975	1975-1976
	—	—	—
Novembre	10,4	10,3	9,8
Décembre	7,1	9,2	5,7
Janvier	9,0	8,5	7,3

En conclusion de ces études sur Cabernet-Sauvignon, il apparaît que, malgré la complexité du cycle de la Vigne, un certain nombre d'effets de la sécheresse sont analogues à ceux que l'on observe sur des plantes annuelles : un stress hydrique agit sur la production de l'année de façon variable selon sa date d'application, sa durée et son intensité en intervenant sur les composantes du rendement, nombre de baies et poids unitaire des baies et sur le transfert des produits de la photosynthèse des feuilles vers les baies. Une compétition existe entre la croissance et l'accumulation des sucres ; lorsque l'eau n'est pas limitante, les phénomènes de croissance l'emportent ; si la sécheresse intervient en cours de maturation des baies, la compétition est encore accentuée au détriment du transfert des sucres.

Au-delà de ces effets annuels, la contrainte hydrique intervient sur l'initiation florale lorsque son intensité est très forte et sa durée longue. En outre, il nous semble possible de conclure à l'action d'une alimentation hydrique sur la dormance des yeux de la base qui se traduit par un accroissement du nombre de bourgeons non débourrés, donc par une réduction de la fertilité.

Reçu pour publication en novembre 1979.

Remerciements

Notre gratitude s'adresse à ceux qui nous ont aidés dans la réalisation de cette expérience : M. le Professeur Boubals (Chaire de viticulture, E.N.S.A. de Montpellier) pour ses conseils sur la conduite de la vigne, M. Valat, Directeur de l'A.N.T.A.V. qui a fourni les plantes, M. Panine (C.N.A.B.R.L.) grâce à qui le contrôle de la nutrition des souches en pots a été assuré à l'optimum et MM. Lessut et Lallemand (C.N.A.B.R.L.) dont le travail persévérant a permis d'obtenir ces résultats.

Nos remerciements vont aussi à M. Robelin, Station d'agronomie I.N.R.A. de Clermont-Ferrand, dont les suggestions constructives ont facilité l'interprétation de nos données.

Summary

Effects of drought on the vine

I. — *Studies on Cabernet-Sauvignon*

The pot experiments, carried out with the Cabernet-Sauvignon vine variety, related to the effects of drought and the role of the leaf area. Thus was evinced this variety's periods of sensitiveness to water stresses, whether this involves growth of either the vegetative organs or the berries, or yet build-up of sugars.

There being no drought, the leaf area per unit of yield affects variably the sugar content of the berries, this leading to an estimation of the optimum height of the tied-up leaves ; the effect of drought on the sugar content is superadded to this overall change.

A tentative explanation is given : dormancy and the role of optimally water supply on the increased number of buds not yet burst at the base of the cane (a one-year vine branch).

Zusammenfassung

Auswirkung der Trockenheit auf Reben.

I. — *Untersuchung auf Cabernet-Sauvignon.*

Das, in Vegetationsbehältern ausgeführte Experiment auf Cabernet-Sauvignon betrifft die Auswirkungen der Trockenheit und die Rolle der Blattoberfläche. Es erlaubt die Empfindlichkeitsperioden dieser Landsorte bezüglich der hydrischen Beanspruchung ins Licht zu stellen, sei es handle sich um die Wachstum serscheinungen der vegetativen Organe und der Beeren oder der Zuckeransammlung. Es wird gezeigt dass in Abwesenheit von Trockenheit, die Blattoberfläche je Ergiebigkeitseinheit den Zuckergehalt auf unterschiedliche Weise beinflusst. Der Abschluss dieses Ergebniss ist die Abschätzung einer optimalen Höhe des anspalierten Laubes. Die Auswirkung der Trockenheit auf den Zuckergehalt fügt sich dieser allgemeinen Wandlung hinzu.

Es wird versucht, durch Inhibition und Einschlafung, die Rolle einer maximalen hydrischen Nährung auf die Zunahme der Anzahl nicht ausgetriebener Knospen am Fusse der Ranke zu erklären.

РЕЗЮМЕ

Действие засухи на виноградыне растения

I изучение проведенное на сорте каберне-совиньон.

МЕРИО СУСАННА, РОЛЛЕН Г., РЮТТЕН П.

В опыте с сортом Каберне-Совиньон, проведенном в вегетационных сосудах, изучались действие засухи и роль листовой площади. Опыт этот позволил выяаить периоды чувствительности сорта к стеснению водного питания, отражавшуюся как на явлениях роста вегетативных органов и ягод, так и на накоплении сахаров растением. Доказывается, что в отсутствии засушливых периодов, листовая площадь на единицу урожая влияет различным образом на содержания сахаров в ягодах. Полученный результат приводит к возможности оценки оптимальной высоты подвязки листьев ; действие засухи на содержание сахаров дополняет это общее изменение.

Делается также попытка об'яснения роли максимального водного питания в увеличении числа нераскрывшихся почек базы побега.

Références bibliographiques

ALLEWELDT G., HOFÄCKER W., 1975. Influence of environmental factors on bud burst, inflorescences, fertility and shoot growth of vines. *Vitis*, **14**, 103-115.

AZZI G., 1954. *Ecologie agricole*. 428 p. Baillère et Fils. Paris.

BESSIS R., 1965. *Recherches sur la fertilité et les corrélations de croissance entre bourgeons chez la Vigne* (*Vitis Vinifera* L.). Thèse Doctorat es Sciences Naturelles. 236 p. Dijon.

BRANAS J., BERNON G., LEVADOUX L., 1946. *Eléments de viticulture générale.* 400 p. Ec. Nat. Agr. Montpellier.

BRANAS J., VERGNES A., 1965. Sur un essai d'irrigation de la Vigne. *Le Progrès Viticole*, 31 juillet, 33-41 et 15 août, 75-83.

BRAVDO B., LAVEE S., SAMISH R. M., 1972. Analysis of water consumption of various grapevine cultivars. *Vitis*, **10,** 279-291.

BUTTROSE S., 1974. Fruitfulness in grapevines : effects of water stress. *Vitis*, **12,** 299-305.

CAROLUS M., 1970. *Recherches sur l'organogenèse et l'évolution morphologique du bourgeon latent de la vigne* (*Vitis Vinfera* L., var. Merlot). Thèse 3e cycle, 147 p., Bordeaux.

CERNY J., HASLBACH J., JASA B., 1967. Influence de l'irrigation sur le rendement et la qualité du raisin (en tchèque). *Acta Univ. Agric.*, Brno, 239-250.

CHOUARD P., 1951. *Dormances et inhibitions des graines et des bourgeons. Préparation au forçage. Thermopériodisme.* 157 p., Centre Doc. Univ. Paris.

GALET P., 1956. *Cépages et vignobles de France.* 4 vol., 3 500 p. Imprimerie Paul Dehan, Montpellier.

HENDRICKSON A. H., VEIHMEYER F. J., 1931. Irrigation experiments with grapes. *Amer. Soc. Hort. Sci. Proc.*, **28,** 151-157.

HUGLIN P., 1958. Recherches sur les bourgeons de la vigne : initiation florale et développement végétatif. *Ann. agron.*, 113-272.

KATTAN A. A., 1963. Seasonal changes in the quality of Concord grapes. *Arkansas Farm Res.*, **12,** 9.

LUK'JANOV A. D., 1961. Efficience de l'irrigation des vignobles de la région de Rostov (en russe). *Vinodelije i Vinograd*, **21,** 49-53.

MAGRISSO J., 1970. *Le régime hydrique et l'arrosage de la vigne* (Traduction C.T.G.R.E.F. 1973. Groupement d'Aix-en-Provence).

MAGRISSO J., SLAVEDEVA T., 1975. Influence de la fumure et de l'humidité du sol sur l'intensité de la photosynthèse chez la vigne (en bulgare). *Gradinar. Lozar. Nauka*, **12,** 64-73.

MAGRISSO J., TONCEV G., 1967. Recherches sur le régime hydrique et l'arrosage du cépage Gamza (en bulgare). *Gradinar. Lozar. Nauka*, **2,** 241-250.

MÉRIAUX S., ROLLIN H., RUTTEN P., 1974*a*. Effets de la sécheresse sur quelques phénomènes de croissance de l'appareil végétatif de la vigne. *Connaiss. Vigne Vin*, **8,** 109-128.

MÉRIAUX S., RUTTEN P., ROLLIN H., 1974*b*. De l'influence de l'alimentation hydrique sur la morphologie, la teneur en eau et en matière sèche des feuilles de *Vitis Vinifera* L., variété Cabernet-Sauvignon. *C. R. Acad. Sc. Série* D., **278,** 731-734.

MÉRIAUX S., WEBER M., ROLLIN H., RUTTEN P., 1975. Effets des modalités d'application d'une contrainte hydrique sur quelques aspects de la morphologie et de l'activité de la feuille de *Vitis Vinifera* L., variété Cabernet-Sauvignon. *C. R. Acad. Sc. Série* D,. **281,** 1235-1237.

NICOLOUSSI K., 1965. Utilisation polyvalente de l'aspersion pour les vergers et les vignes (en bulgare). *Acad. Sci. Agr. de Bulgarie*, **5,** 62-74.

NIGOND J., 1967. *Recherches sur la dormance des bourgeons de la vigne.* Thèse Doctorat es-Sciences Naturelles. Paris, 170 p.

PANTIC Z., JAZIC L., 1961. Einfluss der Bewässerung auf der Ertrag, die qualität und die chemische zusammenzung des Weins einiger Weinrebensorten. *Arch. Poljopr.*, **14,** 119-128.

POUGET R., 1963. *Recherches physiologiques sur le repos végétatif de la Vigne* (*Vitis Vinifera* L.) : *la dormance des bourgeons et le mécanisme de sa disparition.* Thèse Doctorat es Sciences Naturelles. 247 p., Bordeaux.

RAVAZ L., 1898. Sur la taille de la Vigne. *Revue de viticulture*, **9,** 208-213.

ROBELIN M., 1963. Contribution à l'étude du comportement du maïs-grain vis-à-vis de la sécheresse. *Journées internationales de l'irrigation.* 69-76, Editions A.G.P.M., Paris.

ROBELIN M., MINGEAU M., 1970. Alimentation en eau et croissance de la betterave sucrière. *Rev. Inst. Intern. Rech. Better.*, **5,** 71-86.

SEGUIN G., 1970. *Les sols de vignobles du Haut-Médoc. Influence sur l'alimentation en eau de la vigne et sur la maturation du raisin*). Thèse Doctorat es Sciences Naturelles. 141 p., Bordeaux.

TSEÏKO A. I., 1957. Appréciation comparative des schémas d'arrosage des vignes (en russe). *Bull. Inform. Sci. Techn.*, Yalta, **1,** 44-51.

VAADIA Y. A., KASIMATIS A. N., 1961. Vineyard irrigation trials. *Amer. J. Oenol. vitic.*, **12,** 88-98.

VIALA P., VERMOREL V., 1910. *Traité général de viticulture. Ampèlographie*, 7 vol. Masson et Cie, Paris.

Ann. agron., 1979, **30** (6), 577-579.

Chronique des livres

FERRARI Th. J. — *Elements of system-dynamics simulation. A textbook with exercises.* PUDOC, wageningen, 1978, 89 p.

Le but de cet ouvrage est de donner au lecteur une compréhension des principes des feedback systèmes et de l'origine des phénomènes actuels et de convertir les problèmes en diagrammes relationnels de systèmes dynamiques et en équations algébriques simples.

Avec ces équations, on pourra calculer comment le devenir du système est influencé.

Ce livre prend en compte que le lecteur n'a pas de connaissances spécialement approfondies en mathématiques.

En conséquence, l'essentiel des mathématiques nécessaires sont graduellement introduites. Il insiste sur les applications pratiques du concept de system-dynamics en fournissant des problèmes de travail et leur solution.

L'expérience montre que les concepts et les principes de system dynamics sont assez faciles à apprendre mais sont difficiles à convertir dans le langage des system dynamics.

Des exemples et des problèmes sont pris dans différentes disciplines comme la physique, la chimie, process control, la biologie, l'écologie, l'hydrologie, environnement-santé, l'économie, sciences sociales, etc...

Ces problèmes sont traités de telle sorte que les lecteurs d'autres disciplines puissent les résoudre avec system-dynamics. L'avantage de cette approche est que le lecteur devient capable de s'adapter aux problèmes de disciplines variées pouvant être décrits et expliqués par analogies. Ceci est important pour approche interdisciplinaire des problèmes.

M.-C. D.

KLUGE M., TING I. P. — *Crassulacean Acid Metabolism. Analysis of an ecological adaptation.* Collection : Ecological studies 30, Springer Verlag Ed., Berlin, 1978, 209 p.

Cet ouvrage fait le point de recherches entreprises à propos des plantes à métabolisme CAM. C'est apparemment la première monographie sur ce sujet qui vient parfaitement à son heure après les études des métabolismes de type C3 puis C4. Avec environ 500 références bibliographiques, les auteurs ont certainement utilisé l'essentiel des références existant sur ce sujet en langues anglaise, allemande et française. Pour une fois les travaux français sont cités en bonne place.

Ce type de métabolisme que l'on trouve principalement chez les Crassulacées et autres espèces succulentes, a fasciné de nombreux physiologistes végétaux depuis plus de 150 ans. On le comprend maintenant comme une modification de l'assimilation photosynthétique du carbone semblable au métabolisme C4, mais où les processus de carboxylation et décarboxylation sont dissociés dans le temps au lieu de l'être dans l'espace. Ce type de métabolisme permet une adaptation des plantes aux situations écologiquement arides.

Cette monographie traite notamment des aspects taxonomique, morphologique et anatomique, biochimique, physiologique et écologique du phénomène CAM. Les aspects agronomiques ne sont pas oubliés et bien que peu d'espèces de ce type (Ananas, Opuntia...) soient actuellement cultivées, les auteurs laissent entrevoir des perspectives d'utilisation plus importantes eu égard notamment à leur excellente efficience de l'eau : 18 à 150 kg d'eau pour fabriquer 1 kg de matière sèche, contre 250 à 350 pour un C4 et 450 à 950 pour un C3 ; en contre-partie, leur taux de croissance est nettement plus faible. Malgré tout, ce type de plante présente un intérêt évident pour la mise en valeur des zones arides.

S. de P.

MITSUI A. *et al.* ed. — *Biological solar energy conversion.* Acad. Press, New York, 1977, 454 p.

Cet ouvrage constitue la synthèse de 34 communications présentées à la Conférence de Miami (USA) 15-18 novembre 1976, patronnée par le programme de coopération scientifique Japon-Etats-Unis.

Durant ces dernières années, les scientifiques se sont rendus compte que les mécanismes normaux de la conversion biologique de l'énergie solaire, particulièrement ceux associés à la photosynthèse, doivent être adaptés à la production de fuels et d'énergie d'origine chimique comme celle représentée par l'hydrogène.

Le premier chapitre, intitulé : « Captation et utilisation de l'énergie solaire », occupe presque le tiers du livre. Il est consacré à des sujets tels que l'enzymologie des hydrogénases, les mécanismes moléculaires de la production d'hydrogène par les organismes vivants et leurs relations avec la photosynthèse, les moyens de produire de l'hydrogène *in vivo* et *in vitro*.

Le second chapitre correspond à un balayage des connaissances actuelles dans le domaine de l'assimilation photosynthétique du carbone et de la photorespiration.

La fixation biologique de l'azote est discutée dans une troisième partie, que ce soit chez les organismes animaux comme les bactéries, ou chez les végétaux, comme les céréales ou les algues.

L'ouvrage se termine, au chapitre IV, par la présentation d'applications pratiques. Plusieurs articles, par exemple, traitent de la production de biomasse par la culture d'algues, en particulier dans le cadre de dermes marines.

L'obtention de méthane par fermentation anaérobie de déchets animaux est également présentée comme une voie prometteuse de récupération d'énergie.

Cet ouvrage, on peut le constater, constitue une large source d'informations sur les problèmes techniques et économiques concernant les possibilités de conversion de l'énergie solaire.

M.-C.

BAGDONAS A., GEORG J. C., GERBER J. F. — *Techniques of frost prediction and methods of frost and cold protection.* Technical note nº 157, WMO nº 487, 1978, 160 p.

L'importance du froid comme facteur de l'environnement influant sur la croissance des cultures est bien connue.

Les dégâts que le gel occasionne peuvent être souvent évités par des méthodes de protection active ou passive.

Les météorologistes sont à même de fournir les avertissements préalables lorsqu'il devient nécessaire d'employer ces types de protection.

Les auteurs de cette note technique ont passé en revue l'évolution récente des travaux dans le domaine de la lutte contre le gel.

M. J. C. Georg (USA), dans un premier chapitre, étudie les méthodes utilisées dans divers pays pour prévoir les températures minimales et l'apparition du gel. Il décrit, en les évaluant, les méthodes empiriques, théoriques, semi-théoriques et subjectives classiques qui sont actuellement employées.

Puis, M. J. F. Gerber (USA) et M. A. Bagdonas (URSS) traitent, le premier pour les Etats-Unis, le second pour l'Europe et l'Asie, les méthodes appliquées dans ces diverses régions du globe pour la protection contre le gel, et les principes théoriques sur lesquels elles sont fondées. Les résultats sont analysés et l'efficacité des diverses méthodes évaluée.

La bibliographie présentée est abondante.

Ce rapport présente pour les agrométéorologistes une importance capitale devant l'ampleur des problèmes restant à résoudre dans le domaine de la lutte contre le gel.

M.-C. D.

POSPISILOVA J. et SOLAROVA J. — *Water in plants bibliography.* Vol. 3, 1977, ref. 2480-3686/ACE-ZYA. Dr. W. Junk Ed., The Hague, 1979, 111 p.

Avec une régularité remarquable vient de paraître le troisième volume de cette bibliographie dont nous avons eu l'occasion de présenter les deux premiers tomes en 1977 et 1978 dans cette rubrique de presse.

Nous avions alors insisté sur son contenu scientifique, comparable à un « profil » annuel sur le sujet eau dans la plante. Les différents index : matière, plante, auteur permettent un affinement rapide de la recherche selon le sujet étudié.

La signalisation du titre des différents articles apparaît en général dans la langue d'origine. Une traduction en anglais est ajoutée pour les titres en langues de l'Europe de l'Est.

Rappelons que cet ouvrage est l'œuvre d'un groupe de chercheurs de l'Institut de Botanique Expérimentale de Prague et cherche à couvrir le plus complètement possible la littérature mondiale se rapportant à l'étude de l'eau dans la plante.

M.-C. D.
15 octobre 1979.

JONGERIUS A. et RUTHERFORD G. K., ed. — *Glossary of soil micromorphology. English, French, German, Spanish and Russian.* Wageningen, Pudoc, 1979, 152 p.

Le groupe de travail international de micromorphologie du sol formé en 1969 s'était fixé la tâche de revoir la terminologie existante dans ce domaine et d'en publier un glossaire. Les termes ont des origines diverses mais dans l'ensemble seuls les mots relevés plus d'une fois ont été retenus.

Le glossaire contient 661 termes regroupés en 54 catégories. Chaque terme est entré d'abord en anglais, puis en français, allemand, espagnol et russe. Viennent ensuite l'indication de la source bibliographique et une définition en anglais du terme, avec éventuellement des références à d'autres termes.

L'ouvrage est complété par un index matières en 5 langues.

Ann. Agron., 1979, **30** (6), 581-582.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1979

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, D. MASSIMINO, J. P. VIVOLI, Christiane RICHAUD. — Le laboratoire $C_3$3A. Un outil au service de la physiologie de la plante entière. I. — Les chambres de culture et les systèmes de mesures associés 139

M. ANDRÉ, A. DAGUENET, Jacqueline MASSIMINO, D. MASSIMINO, Christiane RICHAUD. — Le laboratoire $C_3$3A. Un outil au service de la physiologie de la plante entière. II. — Possibilités de la mini-informatique et premiers résultats 153

Ph. BUSSIÈRES. — Influence des caractéristiques de particules d'amendements calcaires sur leur solubilité carbonique 121

P. CHASSIN. — Détermination de l'angle de contact acides humiques-solutions aqueuses de diols. Conséquences sur l'importance relative des mécanismes de destruction des agrégats .. 481

Laurette COMBE. — Effet du gaz carbonique et de l'éclairement sur la croissance et la répartition des assimilats chez le Radis (*Raphanus sativus* L.) 217

A. P. CONESA, H. METTAUER, R. HAEFLINGER, R. TRENDEL, Y. TUAL, P. GROSS. — Etude de la productivité de l'agrosystème betteravier en Alsace. Essai d'établissement d'un modèle empirique prédictif 281

P. CORNILLON, M. BOUDON. — Influence de la température des racines sur la croissance des laitues et des tomates. Incidence sur leur composition lipidique 431

J. DECAU, J.-R. MARTY. — Utilisation de l'azote des fumures par les sorghos fourragers 89

J. DECAU, G. DUTHEN, B. PUJOL. — Arrière-effet des fumures azotées sur les bilans économiques, énergétique et azoté des fumures des cultures ultérieures. Analyse théorique du problème et résultats expérimentaux 305

J. DEJOU, J. GUYOT, J. TRICHET. — Un exemple d'altération superficielle naissante sur roches basiques en région tempérée humide. Cas des gabbros dioritiques, de la haute vallée de la Jordanne (Cantal) 63

J. E. DELPHIN, A. Ph. CONÉSA. — Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles, dans la plaine de la Hardt. I. — Etat des réserves organiques 167

J. E. DELPHIN, A. Ph. CONÉSA. — Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles, dans la plaine de la Hardt. II. — Bilan humique 179

J. E. DUFEY, C. M. PETIT, Y. GOBLET, H. LAUDELOUT. — Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échange et de précipitation dans les systèmes sol-eau-électrolyte 53

C. DUTHION. — Pouvoir réducteur des racines des plantes cultivées. Ses modifications par une courte période d'excès d'eau 323

Geneviève FAURIE, R. BARDIN. — La volatilisation de l'ammoniac : I. — Influence de la nature du sol et des composés azotés 363

Geneviève FAURIE, R. BARDIN. — La volatilisation de l'ammoniac. II. — Influence des facteurs climatiques et du couvert végétal 401

J. GUÉRIF, A. FAURE. — Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. I. — Etude statistique 387

J. GUÉRIF. — Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage. II. — Matières organiques libres et liées 469

Agnès HUBERT, R. CALVET. — Détermination du coefficient de diffusion moléculaire de solutés dans des milieux poreux saturés en eau 233

J. G. HUGUET, A. M. SAUGNAC, P. DECOMBE. — Rationalisation des apports d'engrais en vergers par épandage en bandes 455

J. LE RENARD. — Description d'une méthode de détermination du coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal en milieu poreux homogène saturé en eau. II. — Utilisation d'un modèle mathématique à trois paramètres dont un phénoménologique 109

Ph. MALET. — Liaison statistique entre le développement et la croissance chez les plantes : Application d'un modèle simplifié à l'analyse de la croissance 415

B. MARY, J. C. RÉMY. — Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture. I. — Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée 513

J. R. MARTY, A. HILAIRE. — Etudes préliminaires des effets de l'insertion du soja dans les rotations céréalières 191

Suzanne MÉRIAUX, H. ROLLIN, P. RUTTEN. — Effets de la sécheresse sur la vigne. I. — Etudes sur Cabernet-Sauvignon 553

Martine OLLIVIER, P. MALET. — Un modèle d'action des techniques culturales sur le blé. I. — Principe et premiers résultats sur une variété cultivée dans un domaine expérimental 529

A. PERRIER, M. HALLAIRE. — Rapport de l'évapotranspiration potentielle calculée à l'évaporation mesurée sur bac. I. — Justification d'une relation expérimentale obtenue en zone tropicale 329

A. PERRIER, M. HALLAIRE. — Rapport de l'évapotranspiration potentielle calculée à l'évaporation mesurée sur bac. II. — Expression en fonction d'un facteur de déséquilibre hydrique entre les surfaces évaporantes et l'air 337

B. POMMEL. — Comparaison de l'utilisation par le maïs du phosphore des boues résiduaires ou du phosphate monocalcique pour différents niveaux de zinc et de fer dans le substrat 443

M. K. RAZZAGHE, M. ROBERT. — Géochimie des éléments majeurs des micas en milieu organique : mécanismes de l'altération des silicates 493

Ch. RIOU, J. P. LAGOUARDE, R. CHARTIER. — Evaporation du sol nu en zone semi-aride et en conditions hivernales. Relations avec l'albédo et la température de la surface du sol 347

Ginette SIMON-SYLVESTRE. — Effets de quelques pesticides sur la minéralisation de l'azote organique du sol, la nitrification et la cellulolyse 265

P. STENGEL. — Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ* 27

P. VACHIER, P. CAMBIER, R. PROST. — Structure d'un milieu poreux : la craie 247

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME. — Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. II. — Interception de l'énergie solaire par une culture .. 1

Chronique des livres 105, 213, 577